



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

TERMoeLEKTRICKÉ MODULY PRO MIKROKOGENERAČNÍ ZDROJE

THERMOELECTRIC GENERATORS FOR MICRO-CHP UNITS

DIZERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Marian Brázdil

ŠKOLITEL

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.

BRNO 2019

Abstrakt

Malé domovní teplovodní kotle na tuhá paliva představují významný zdroj znečištění ovzduší. Je proto snahou zvyšovat jejich účinnost spalování a omezovat produkci vznikajících škodlivých exhalací. Z tohoto důvodu dochází legislativně k omezování provozu starších a v současnosti již nevyhovujících typů domovních kotlů. Preferovanými typy kotlů jsou nízkoemisní kotle, především automatické nebo zplyňovací. Větší část z nich ale, oproti předchozím typům kotlů, vyžaduje také připojení k elektrické rozvodné síti. Pokud dojde k dlouhodobějším výpadkům elektrického napájení, provoz novějších typů kotlů je limitovaný. Na trhu jsou v současnosti dostupné i nízkoemisní zplyňovací kotle spalující dřevo a uhlí, které je možné provozovat i při výpadku elektrického napájení, ale pouze v otopných soustavách s přirozenou cirkulací vody. V otopných soustavách s nuceným oběhem vody není možné tyto kotle, ani krby nebo krbové vložky s teplovodními výměníky při výpadku napájení provozovat bez externího bateriového napájení. Dizertační práce se proto zabývá otázkou, zda by bylo možné pomocí termoelektrické přeměny odpadního tepla spalin malých nízkoemisních spalovacích zařízení získat dostatečné množství elektřiny, napájet jejich oběhová čerpadla a zajistit provoz v soustavách s nucenou cirkulací vody nezávisle na dodávkách elektřiny z rozvodné sítě.

Aby bylo možné odpovédět na tuto otázku, byl vytvořen simulační nástroj predikující výkonové parametry termoelektrických generátorů. Oproti dříve publikovaným pracem je do výpočtů a simulací zahrnutý i vliv generátoru na funkčnost odkouření kotlů. Pro ověření simulačního nástroje byl postaveny experimentální termoelektrický generátor využívající odpadního tepla spalin automatického teplovodního kotle na dřevní pelety. Vedle tohoto generátoru vznikla také experimentální termoelektrická krbová vložka a další zařízení související s experimenty.

Klíčová slova

Termoelektřina, termoelektrický modul, termoelektrický generátor, kogenerace, kotel, tuhé palivo

Abstract

Small domestic hot water boilers burning solid fuels represent a significant source of air pollution. It is therefore an effort to increase their combustion efficiency and to reduce the production of harmful emissions. For this reason, the operation of older and currently unsatisfactory types of household boilers has been legally restricted. Preferred types of boilers are low-emission boilers, especially automatic or gasification boilers. Most of them, however, in comparison with previous types of boilers, also require connection to the electricity grid. If there is a long-term failure in electricity grid, the operation of newer boiler types is limited. Wood and coal gasification boilers are currently available on the market and can be operated even in the event of a power failure, but only in heating systems with natural water circulation. In heating systems with forced water circulation, these boilers, fireplaces or fireplace inserts with hot-water heat exchangers cannot be operated without external battery supply in the event of a power failure. The dissertation thesis therefore deals with the question of whether it would be possible by thermoelectric conversion of waste heat of flue gases of small-scale low-emission combustion hot water domestic boilers to obtain sufficient electricity, to power supply their circulation pumps and to ensure operation in systems with forced water circulation independently of electricity supply from the grid.

In order to answer this question, a simulation tool predicting the power parameters of thermoelectric generators was created. Compared to previously published works, the calculations and simulations include the influence of the generator on the boiler flue gas functionality. To verify the simulation tool, an experimental thermoelectric generator was built using the waste heat of the flue gas of an automatic hot water boiler for wood pellets. In addition to this generator, there was also created an experimental thermoelectric fireplace insert and other equipment related to these experiments.

Keywords

Thermoelectrics, Thermoelectric Module, Thermoelectric Generator, Cogeneration, Combined Heat and Power, Boiler, Solid Fuel

Bibliografická citace

BRÁZDIL, Marian. *Termoelektrické moduly pro mikrokogenerační zdroje*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/113732>. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Jiří Pospíšil.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem dizertační práci na téma Termoelektrické moduly pro mikrokogenerační zdroje vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

V Brně dne 25. 7. 2019

.....
Marian Brázdil

Poděkování

Na tomto místo bych rád poděkoval vedoucímu práce doc. Ing. Jiřímu Pospíšilovi, Ph.D. za ochotu, vstřícnost a podporu, kterou se mi od něj v průběhu vypracovávání této práce i souvisejících projektů dostalo. Děkuji všem svým kolegům z Odboru energetického inženýrství Energetického ústavu a pracovníkům Fakulty strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně, minulým i současným, kteří mi pomáhali nebo poskytli zázemí pro vypracování této práce.

Jmenovitě děkuji Ing. Ladislavu Šnajdárkovi za pomoc při sestavování experimentálních zařízení a měřicích tratí, pomoc při získávání naměřených dat, za diskuzi a veškeré cenné připomínky. Dále doc. Ing. Marku Balášovi, Ph.D. za cenné rady a pomoc při vypracovávání práce a společně s Ing. Martinem Lisým, Ph.D. pak za jejich pomoc při sestavování experimentálních zařízení. Ing. Otakaru Štelcovi za pomoc při sestavování experimentálního zařízení a měření, Milanu Havlíčkovi za pomoc při sestavování experimentálních tratí, Ing. Miroslavu Skácelovi za konzultace při vytváření matematického modelu, Ing. Radomíru Prušovi za pomoc při sestavování elektrických částí experimentálních zařízení a Ing. Radomíru Chýlkovi za pomoc při zpracování fotodokumentace termoelektrických modulů.

Především ale děkuji celé své rodině a mým nejbližším, bez kterých by tato práce nevznikla. Speciální poděkování patří mé partnerce Daně. Za to, že ve mě věřila a byla mou oporou.

Seznam použitých symbolů

A	plocha příčného řezu termoelementu	(m^2)
A_r	měrná popelnatost	(% kg/MJ)
A_{te}	průřez polovodičových sloupků	(m^2)
c	měrná tepelná kapacita vody	($Jkg^{-1}K^{-1}$)
C_{max}	maximální tepelná kapacita látky (procházející výměníkem)	(JK^{-1})
C_{min}	minimální tepelná kapacita látky (procházející výměníkem)	(JK^{-1})
$C_{p,spal}$	měrná tepelná kapacita spalín	($Jkg^{-1}K^{-1}$)
$C_{p,voda}$	měrná tepelná kapacita chladicí vody	($Jkg^{-1}K^{-1}$)
g	tíhové zrychlení	(ms^{-2})
H	dopravní výška čerpadla	(m)
I	elektrický proud	(A)
I_{sc}	proud při zkratu	(A)
j	proudová hustota	(Am^{-2})
K	tepelná vodivost termoelektrické dvojice	($Wm^{-1}K^{-1}$)
k_c	součinitel prostupu tepla na straně vody	($Wm^{-2}K^{-1}$)
k_h	součinitel prostupu tepla na straně spalín	($Wm^{-2}K^{-1}$)
L	délka sloupku	(m)
m	zátěžný poměr	(-)
\dot{m}_{spal}	hmotnostní tok spalín	(kgs^{-1})
\dot{m}_{voda}	hmotnostní tok chladicí vody	(kgs^{-1})
N	počet termoelektrických dvojic	(-)
P	výkon	(W)
p_D	parciální tlak vodní páry	(Pa)
Q	měrný tepelný výkon kotle	(W)
\dot{Q}	objemový průtok vody	(m^3s^{-1})
\dot{Q}_h, \dot{Q}_c	tepelný tok na hranici teplé a studené strany	(W)
R	elektrický odpor	(Ω)
R_i	vnitřní odpor	(Ω)
R_L	elektrická zátěž	(Ω)
R_c^{te}	součet tepelných odporů na rozhraní termoelektrických modulů a chladicího výměníku	(KW^{-1})
R_h^{te}	součet tepelných odporů na rozhraní termoelektrických modulů a spalínového výměníku	(KW^{-1})
S_h, S_c	velikost teplosměnných ploch	(m^2)
S_r	měrná sirnatost	(gMJ^{-1})
T	teplota	(K)
\bar{T}	střední teplota	(K)

t_k	teplota sytosti vodní páry	(°C)
t_{sp}^r	teplota rosného bodu vodních par	(K)
T_{spal}	teplota spalín	(K)
T_{voda}	teplota chladicí vody	(K)
U	napětí	(V)
U_{OC}	svorkové napětí	(V)
U_{SC}	napětí při zkratovém proudu	(V)
V_0	svorkové elektrické napětí	(V)
X_u	poměrný obsah popela v úletu	(-)
Z, Z_c	koeficient termoelektrické účinnosti	(K ⁻¹)
ZT	koeficient termoelektrické účinnosti	(-)
α	Seebeckův koeficient	(VK ⁻¹)
α_{AB}	relativní Seebeckův koeficient	(VK ⁻¹)
β	součinitel	(-)
β_{spal}	ztrátový součinitel vyjadřující velikost tepelných ztrát spalínového výměníku	(-)
β_{voda}	ztrátový součinitel vyjadřující velikost tepelných ztrát vodního výměníku	(-)
β_c^{te}	ztrátový součinitel vyjadřující velikost tepelných ztrát na rozhraní termoelektrického modulu a vodního výměníku	(-)
β_h^{te}	ztrátový součinitel vyjadřující velikost tepelných ztrát na rozhraní spalínového výměníku a termoelektrického modulu	(-)
ε_{spal}	efektivita spalínového výměníku	(-)
ε_{voda}	efektivita chladicího výměníku	(-)
η	účinnost čerpadla	(-)
η	tepelná účinnost	(-)
η_{max}	maximální tepelná účinnost	(-)
λ_c	tepelná vodivost kontaktní vrstvy	(Wm ⁻¹ K ⁻¹)
λ_e	elektronová tepelná vodivost	(Wm ⁻¹ K ⁻¹)
λ_L	mřížková tepelná vodivost	(Wm ⁻¹ K ⁻¹)
Π	Peltierův koeficient	(WA ⁻¹), (V)
ρ	hustota vody	(kgm ⁻³)
ρ	měrný elektrický odpor	(Ωm)
ρ_c	přechodový měrný elektrický odpor	(Ωm)
σ	elektrická vodivost	(Sm ⁻¹), (Ω ⁻¹ m ⁻¹)
ϱ	rezistivita	(Ωm)
τ	Thomsonův koeficient	(VK ⁻¹)

Seznam použitých zkratek

TE	termoelektrický
TEG	termoelektrický generátor
TEM	termoelektrický modul
TV	teplá voda
CPM	Constant Parametr Model/Constant Properties Model
CTO	Constant Temperature Operation
MPPT	Maximum Power Point Tracking

Indexy

h	horká strana
c	studená strana

Obsah

Seznam použitých symbolů	vi
Seznam použitých zkratk.....	viii
Úvod.....	1
1. Současný stav poznání	3
1.1. Termoelektrická přeměna	3
1.1.1. Fyzikální podstata	3
1.1.2. Termoelektrické materiály	5
1.1.3. Termoelektrická polovodičová dvojice	7
1.1.4. Termoelektrické materiály a účinnost termoelektrické přeměny	10
1.1.5. Matematický popis termoelektrické dvojice	12
1.2. Termoelektrické moduly.....	17
1.2.1. Parametry komerčně dostupných termoelektrických modulů	18
1.2.2. Mechanické namáhání termoelektrických modulů	19
1.2.3. Měření parametrů termoelektrických modulů.....	20
1.3. Termoelektrické generátory	21
1.3.1. Konstrukce termoelektrických generátorů	21
1.3.2. Historický přehled aplikací termoelektrických generátorů	22
1.3.3. Termoelektrické generátory ve spojení s domovními spalovacími zařízeními	23
1.3.4. Optimalizace generátorů	24
1.4. Domovní spalovací zařízení na tuhá paliva.....	27
1.4.1. Spotřeba elektrické energie	28
1.4.2. Oběhová čerpadla a ekodesign energetických spotřebičů	32
2. Shrnutí provedené rešerše a její analýza.....	33
2.1. Termoelektrická přeměna a termoelektrické materiály	33
2.2. Mikrokogenerace a domovní spalovací zařízení.....	34
3. Vymezení cílů dizertační práce a způsob jejich řešení	36

3.1.	Vědecká otázka	36
3.2.	Předpoklady a pracovní hypotézy.....	36
3.3.	Způsob provedení dizertační práce	38
4.	Použité metody	40
4.1.	Simulační nástroj pro hodnocení uplatnění termoelektrického generátoru.....	40
4.1.1.	Popis návrhu simulačního nástroje a jednotlivých výpočtů	40
4.1.2.	Příkony oběhových čerpadel	47
4.1.3.	Metodika ověření simulačního nástroje	48
4.2.	Experimentální termoelektrický generátor pro automatický teplovodní kotel.....	49
4.2.1.	Navržená konstrukce experimentálního termoelektrického generátoru	49
4.2.2.	Experimentální měření výkonových charakteristik.....	50
4.3.	Experimentální krbová vložka s termoelektrickým generátorem	51
4.3.1.	Navržená konstrukce experimentálního termoelektrického generátoru	51
4.4.	Měřicí aparatury termoelektrických generátorů	52
4.4.1.	Zkušební stend termoelektrických modulů	52
4.4.2.	Laboratorní chladicí smyčka termoelektrického generátoru a zkušebního stendu termoelektrických modulů	53
4.4.3.	Testovací smyčka s nízkopříkonovým čerpadlem	54
5.	Výsledky simulací a výsledky měření.....	56
5.1.	Experimentální ověření provozních parametrů termoelektrického generátoru na automatickém kotli.....	56
5.1.1.	Výsledky měření	56
5.1.2.	Diskuze výsledků	58
5.1.3.	Ověření simulačního nástroje.....	58
5.1.4.	Diskuze výsledků	59
5.2.	Experimentální ověření provozních parametrů krbové vložky s termoelektrickým generátorem	59
5.2.1.	Diskuze výsledků	60
5.3.	Simulační nástroj pro hodnocení uplatnění termoelektrického generátoru.....	60
5.3.1.	Případová studie 1: zplyňovací kotel na dřevo.....	60
5.3.2.	Případová studie 2: krbová kamna na dřevo	61
5.3.3.	Případová studie 3: zplyňovací kotel na uhlí	63
5.3.4.	Diskuze výsledků	64
	Závěry a vlastní přínos práce.....	65
	Seznam publikací	68
	Seznam obrázků	70

Seznam tabulek.....	72
Bibliografie.....	74
P1: Historický přehled vybraných termoelektrických generátorů a jejich parametrů	88
P2: Historický přehled vybraných termoelektrických generátorů a jejich parametrů	91
P3: Přehled vybraných oběhových čerpadel a přehled jejich parametrů	104
P4: Výpočet parametrů spalin a odkouření	107

Úvod

Termoelektrické moduly jsou elektrické komponenty složené z polovodičových materiálů. Využívají existence termoelektrických jevů a umožňují termoelektrickou přeměnu - přímou přeměnu tepla na elektřinu anebo transport tepla z nižší teplotní úrovně na vyšší, případně naopak. Historicky se jedná o jednu z nejstarších metod získávání elektrické energie, která se v průběhu technického vývoje a nástupu dalších způsobů přeměn energií dostala do pozadí, ale které se průběžně dostává pozornosti. V minulosti například v souvislosti s objevením syntetických polovodičů ve 40. letech, s ropnou krizí v letech 1973 a 1979, se vzrůstajícími cenami fosilních paliv nebo zájmem o technologie šetrné k životnímu prostředí [1]. Příčiny tomu zavdávají významné fyzikální teorie nebo objevy, které by napomohly zvýšení účinnosti termoelektrické přeměny a jejímu širšímu prosazení. Termoelektrické děje probíhají v pevných látkách, které neobsahují chemické náplně ani rotační komponenty. Termoelektrická zařízení mohou pracovat nezávisle na poloze, být tichá a spolehlivá. Z těchto a dalších důvodů je termoelektrická přeměna obecně považována za perspektivní technologii a je často předkládána jako možný způsob přeměny odpadního tepla a prostředek ke zvýšení účinnosti energetických transformačních procesů. V této souvislosti bývá často uváděna jako jeden z možných způsobů provedení mikrokogenerace. Zejména u nejmenších elektrických výkonů.

Předkládaná dizertační práce se věnuje možnostem využití termoelektrické přeměny a termoelektrickým modulům jako zdrojům elektrické energie a jejich aplikacím v mikrokogeneraci. Zvláštní pozornost je věnována využití a přeměně odpadního tepla a mikrokogeneraci ve spojení s běžnými spalovacími zařízeními v domovní sféře. Je to z důvodu zaměření pracoviště Odboru energetického inženýrství Energetického ústavu Fakulty strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně, na kterém je tato práce předkládána a jeho vědecko-výzkumné činnosti, která je orientována na oblast malých spalovacích zařízení.

Jednotlivé kapitoly dizertační práce jsou členěny do dvou hlavních celků – teoretického rozboru a praktické části práce. Detailní členění práce je provedeno následovně: v první rešeršní kapitole je shrnut současný stav poznání. Je popsána fyzikální podstata termoelektrické přeměny, rozebrány dostupné termoelektrické materiály, účinnosti termoelektrické přeměny a její praktické limity. Jsou popsány jednotlivé typy termoelektrických modulů, zejména nízkoteplotní „bulk“ termoelektrické moduly v takzvané Π -konfiguraci, které se následně uplatňují v praktické části předkládané práce. Dále je proveden popis větších termoelektrických celků, tzv. termoelektrických generátorů a provedena rešerše jejich existujících aplikací. Následuje popis domovních spalovacích zařízení na tuhá paliva. V souvislosti s nimi je provedena analýza spotřeby elektrické energie jednotlivých konstrukčních typů domovních spalovacích zařízení a uvedeny způsoby zabezpečení spalovacích zařízení proti přetopení, ke kterému může dojít v případě náhlých výpadků elektrické energie. Závěr první kapitoly je věnován popisu oběhových čerpadel a jejich energetické účinnosti. Ve druhé kapitole je provedeno shrnutí provedené rešerše a vysloveno zhodnocení. V návaznosti

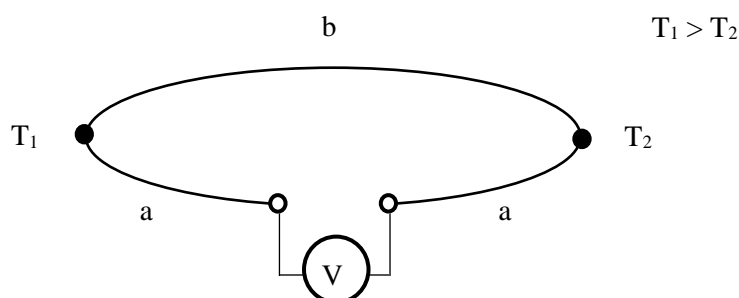
na něj je zvažováno možné využití odpadního tepla domovních spalovacích zařízení a termoelektrické přeměny jako zdroje napájení nízkopříkonových oběhových čerpadel malých kotlů na tuhá paliva. Ve třetí kapitole jsou v souladu se schváleným pojednáním k dizertační práci vymezeny cíle dizertační práce, uvedeny možné hypotézy a proveden stručný rozbor možných způsobů řešení jednotlivých cílů předkládané práce. Ve čtvrté kapitole jsou blíže popsána jednotlivá experimentální zařízení zkonstruovaná v souvislosti s řešením práce, popsány způsoby měření jednotlivých veličin a provedeno vyhodnocení experimentálních tratí. Pátá kapitola předkládá výsledky simulací a experimentálního měření parametrů sestaveného termoelektrického generátoru. Na konci této kapitoly je souhrn a diskuze výsledků. V šesté kapitole je definován předpokládaný postup dalších prací. V závěrečné kapitole práce jsou komentována zjištění, vysloveny závěry a predikován možný budoucí vývoj navrženého termoelektrického systému.

1. Současný stav poznání

1.1. Termoelektrická přeměna

1.1.1. Fyzikální podstata

Termoelektrická přeměna je založena na existenci tzv. Seebeckova jevu, který je možné sledovat v obvodu složeném z dvojice různých elektrických vodičů, jejichž konce jsou spojeny, jak je znázorněno na Obr. 1.1. Dokud je v obvodu udržován rozdíl teplot, vzniká tzv. Seebeckovo napětí [2].



Obr. 1.1 Termoelektrická dvojice

V pevných krystalických látkách podle modelu volných elektronů dochází k přenosu elektrického náboje vlivem volných valenčních elektronů. Tyto nosiče náboje mohou nést kromě náboje také tepelnou energii. V ustáleném stavu, kdy vodičem neprochází tepelný tok, je rozložení koncentrace volných nosičů po délce vodiče rovnoměrné. Pokud dojde k zahřátí jednoho konce vodiče, koncentrace nosičů vzroste, nosiče získají větší kinetickou energii a dochází k difuzi nosičů směrem k chladnějšímu konci vodiče. Mezi konci vodiče vzniká takzvané Seebeckovo napětí. Jeho velikost je úměrná rozdílu teplot. Koeficientem úměrnosti je Seebeckův koeficient α , materiálový parametr vyjadřující velikost elektrického potenciálu nutného pro vyrovnání difuze.

$$V_{\alpha} = - \int_{T_c}^{T_h} \alpha(T) dT \quad (1.1)$$

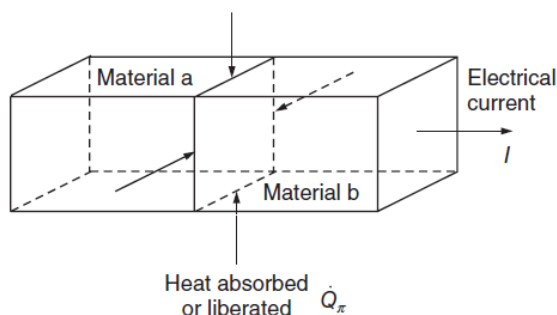
Difuzní proud má za následek vznik elektrického pole, které působí opačným směrem proti dalšímu pohybu nosičů. V případě obvodu složeného ze dvou různých vodičů a spojů o různých teplotách, budou z místa o vyšší teplotě do místa o nižší teplotě oběma vodiči procházet tepelné toky a vznikat

elektrická pole. Pokud by byly vodiče totožné, elektrická pole by se vzájemně vyrušila. Budou-li vodiče z různých materiálů, vznikne mezi spoji rozdíl potenciálů [3-5].

Seebeckův koeficient je teplotně závislým parametrem. Při malých teplotních diferencích je průběh Seebeckova napětí téměř lineární. V technických výpočtech se proto pro zjednodušení teplotní závislost Seebeckova koeficientu mnohdy neuvažuje. Pokud jsou zjednodušeně uvažovány parametry polovodičů jako konstantní a je tím zanedbáván vliv Thomsonova jevu (viz. dále), pak [6]

$$V_{\alpha} = -\alpha (T_h - T_c). \quad (1.2)$$

V souvislosti se Seebeckovým jevem je nutné zmínit i další termoelektrické jevy: Peltierův a Thomsonův jev. Peltierův jev je reversibilním jevem k Seebeckovu jevu. Projevuje se na spojích dvou různých vodičů, jak je vyobrazeno na Obr. 1.2.



Obr. 1.2 Vznik Peltierova jevu na spojích vodičů [6]

Při průchodu elektrického proudu spojem vodičů dochází, v závislosti na směru elektrického proudu, k absorbování nebo uvolňování tepla. Nosiče náboje z vyšších energetických hladin při přechodu do materiálů na nižší energetické hladiny část své energie odevzdávají. V opačném případě, při přechodu z nižších energetických hladin na vyšší energii absorbují. Kolik tepla se při průchodu proudu spojem přeneslo, vyjadřuje Peltierův koeficient Π [1]:

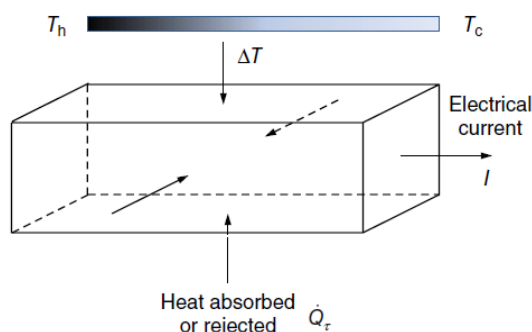
$$\dot{Q}_{\pi} = \Pi I. \quad (1.3)$$

Peltierův koeficient je obtížně měřitelný, je možné ho ale vyjádřit pomocí Kelvinova vztahu $\Pi = \alpha T$, kde α je Seebeckův koeficient a T absolutní teplota. Množství přenášeného tepla pak následně:

$$\dot{Q}_{\pi} = \alpha T I. \quad (1.4)$$

Thomsonův jev se projevuje uvnitř vodičů. V případě, že se homogenní elektrický vodič nachází v teplotním gradientu a prochází jím elektrický proud (viz Obr. 1.3), dochází k reverzibilní výměně tepla. Nosiče náboje pohybující se ve vodiči proti směru teplotního gradientu energii (teplo) pohlcují a jejich potenciální energie vzrůstá. Pokud se nosiče pohybují ve směru teplotního gradientu, snižují svou potenciální energii a teplo uvolňují. Příčinou tohoto chování je teplotní závislost Seebeckova koeficientu, tzv. Thomsonův koeficient $\tau = T \frac{d\alpha}{dT}$. Množství tzv. Thomsonova tepla je úměrné průchozímu elektrickému proudu [1]:

$$d\dot{Q}_{\tau} = I \tau \frac{\partial T}{\partial x} dx. \quad (1.5)$$



Obr. 1.3 Vznik Thomsonova jevu [6]

Pro zjednodušení výpočtů, jak bylo zmíněno výše, je Seebeckův koeficient často uvažován jako teplotně nezávislý $\alpha(T) = konst$, pak $\tau = 0$.

Existence Seebeckova jevu se využívá při měření teplot a přeměně tepelné energie na elektrickou, Peltierova jevu pro teplotní stabilizaci. Peltierův jev se v termoelektrických zařízeních neprojevuje pouze průchodem elektrického proudu z vnějšího elektrického zdroje (termoelektrické chlazení/ohřev), ale i při přeměně tepla na elektřinu, kdy obvodem protéká elektrický proud generovaný Seebeckovým jevem v důsledku tepelného toku. Seebeckův, Peltierův i Thomsonův jev nastávají současně a úzce spolu souvisí.

1.1.2. Termoelektrické materiály

Pro praktické využití termoelektrických jevů jsou zapotřebí vhodné materiály. Seebeck [7] v roce 1822 seskupil různé materiály do tzv. termoelektrické řady podle velikosti jimi produkovaného napětí a položil tím základ pro pozdější konstrukce takzvaných termoelektrických generátorů. První generátory, které vznikly po tomto okamžiku, byly pravděpodobně postavené pouze na počáteční znalosti kombinace vhodných termoelektrických materiálů bez jakékoliv další optimalizace, protože tehdejší konstruktéři neměli matematicky vyjádřenou účinnost termoelektrické přeměny ani výkon generátorů. Po objevení termoelektrických jevů v první polovině 19. století byla termoelektrická přeměna následně uvažována a vysvětlována jako vratný tepelný stroj. Thomson, resp. Lord Kelvin předpokládal, že nevratné procesy mohou být ignorovány [8]. Altenkirch [9] v roce 1909 odvodil pro takzvanou termoelektrickou dvojici (Obr. 1.1) vztah mezi materiálovými parametry a účinností přeměny a jako první ukázal, že vhodný termoelektrický materiál by měl mít velký Seebeckův koeficient, vysokou elektrickou vodivost (malý elektrický odpor) a nízkou tepelnou vodivost. Ioffe [7] následně v 50. letech 20. století vztah mezi materiálovými parametry a účinností přeměny zjednodušil a zavedl tzv. koeficient termoelektrické účinnosti z^1 , který vyjádřil pomocí Seebeckova napětí (α),

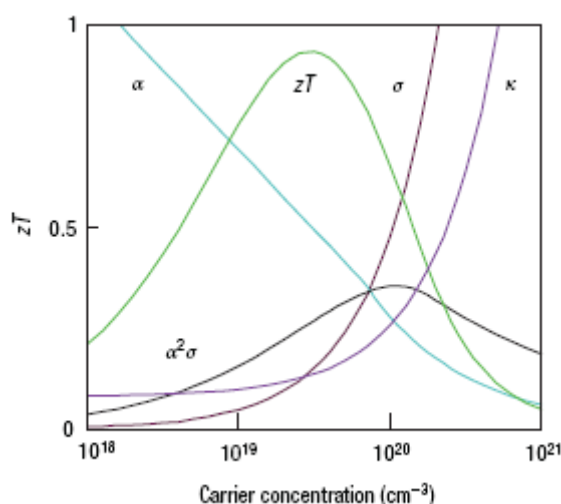
¹ Obecně, viz např. [6], se rozlišuje mezi takzvaným intrinsickým „ z “ (vnitřním) a extrinsickým „ Z “ (vnějším) koeficientem termoelektrické účinnosti, který definoval později Goldsmid. Malým písmenem z se označuje koeficient termoelektrické účinnosti vlastních termoelektrických materiálů a velkým písmenem Z koeficient termoelektrické účinnosti konkrétních prvků, například polovodičových dvojic v termoelektrických modulech o již konkrétních geometriích. V literatuře a původním zdroji [7] se pro popis termoelektrické účinnosti dvojice používá koeficient termoelektrické účinnosti Z . V této kapitole se ale věnuji popisu pouze termoelektrických materiálů, proto byl namísto původního extrinsického koeficientu Z zvolen intrinsický koeficient z .

elektrické vodivosti (σ) a tepelné vodivosti (λ), jak je znázorněno v rovnici (1.6). Parametr (z) se i v současnosti používá pro hodnocení kvality a účinnosti termoelektrické přeměny:

$$z = \alpha^2 \frac{\sigma}{\lambda}, \quad (1.6)$$

$$zT = \alpha^2 \frac{\sigma}{\lambda} T. \quad (1.7)$$

Součin $\alpha^2\sigma$ bývá označován jako power faktor. Po vynásobení koeficientu (z) absolutní teplotou vznikne bezrozměrné kritérium, které postihuje vliv pracovních teplot a používá se pro hodnocení celkové účinnosti termoelektrické přeměny. Podle rovnice (1.7) by vhodné vlastnosti měly mít materiály s velkým Seebeckovým koeficientem, velkou elektrickou vodivostí a současně malou tepelnou vodivostí, která by neměla s rostoucí teplotou narůstat. Tyto parametry souvisí s koncentrací a pohyblivostí nosičů v daném materiálu. Na Obr. 1.4 je znázorněný průběh těchto veličin v pevných látkách.



Obr. 1.4 Průběh sledovaných veličin v pevných látkách v závislosti na koncentraci nosičů náboje [10]

V pevných látkách se s větší koncentrací nosičů zvyšuje elektrická vodivost, větší množství nosičů se podílí na přestupu tepla a roste tím i vodivost tepelná, klesá ale Seebeckův koeficient. V kovech a kovových slitinách je koncentrace nosičů vysoká (řádově 10^{22} cm^{-3}) a není závislá na teplotě. Krystalickou mřížku kovů tvoří kladné ionty, které jsou navzájem poutané kovovou vazbou. Valenční elektrony se mohou pohybovat mezi ionty volně velkou rychlostí. Teplo se přenáší nosiči náboje i vibracemi atomů krystalické mřížky (fonony) [11]. Tepelná vodivost ($10 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ až $1000 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) je součtem mřížkové tepelné vodivosti λ_L , která je v kovech téměř konstantní a elektronové vodivosti λ_e , která s větší koncentrací nosičů roste. Kovy jsou dobré tepelné i elektrické vodiče. Seebeckův koeficient kovů a kovových slitin je ale malý, přibližně $10 \text{ } \mu\text{V/K}$ a méně [1]. Z Wiedemann-Franzova zákona vyplývá, že poměr tepelné a elektrické vodivosti je v kovech konstantní. Není v nich možné zvyšovat elektrickou vodivost a současně snižovat tepelnou vodivost [5]. Termoelektrická účinnost je tak pro kovy malá ($zT \approx 10^{-3}$). Vzhledem k jejich odolnosti jsou jako zdroje elektřiny využitelné v měřicí technice, ale pro hromadnou přeměnu tepla v elektřinu nebo naopak vhodné nejsou.

V polovodičích je koncentrace nosičů náboje menší než u kovů (řádově 10^{14} cm^{-3} až 10^{20} cm^{-3}), teplota má ale vliv na koncentraci nosičů a jejich kinetickou energii [7]. Chování

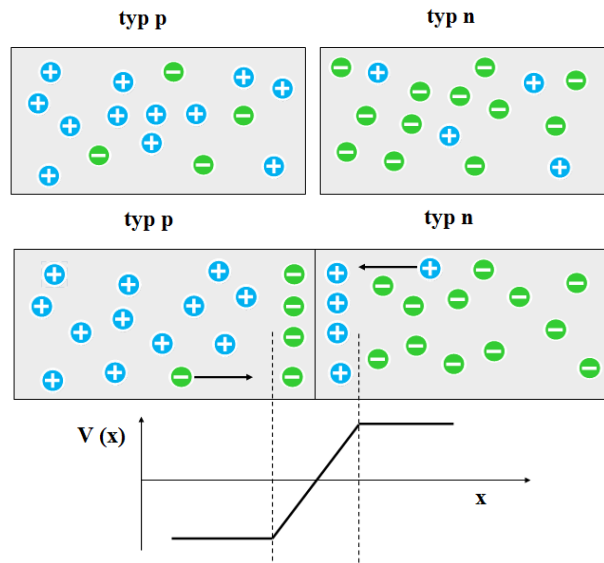
polovodičů výrazně ovlivňují příměsí. Vedení elektrického proudu v polovodičích se od vedení proudů v kovech liší, je zprostředkováno elektronovou bipolární vodivostí. Seebeckův koeficient je v polovodičích větší (přibližně stovky $\mu\text{V/K}$ a více), tepelná vodivost je menší ($1 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ až $100 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$). Mřížková tepelná vodivost λ_L je větší než elektronová vodivost λ_e . Zabudováním těžkých atomů příměsí do krystalické mřížky je možné výrazně snížit tepelnou vodivost polovodičů při zachování dobré elektrické vodivosti. Polovodiče pak mají lepší termoelektrické vlastnosti než kovy a jsou vhodnější pro přímou přeměnu tepla na elektřinu [7]. Na tuto Ioffeho myšlenku zvýšit účinnost termoelektrických materiálů legováním izomorfními prvky nebo směsmi za účelem dosažení nižší tepelné vodivosti polovodičových materiálů následně navázaly další práce význačných autorů, které se zabývaly aplikacemi termoelektrických nanotechnologií, nanostruktur, kvantových jam nebo teček, v současnosti pak například Rashba efektem a topologickými stavy. Blíže například v [1; 12-14].

1.1.3. Termoelektrická polovodičová dvojice

Termoelektrická dvojice², respektive termoelektrická polovodičová dvojice je základním konstrukčním prvkem větších termoelektrických zařízení – termoelektrických modulů a následně termoelektrických generátorů. Polovodičová dvojice je tvořená polovodiči typu P a N spojenými dohromady. Popis termoelektrické dvojice v následující odstavci vychází z popisu provedeného Ioffem [7] a Rowem [1].

Dotováním polovodičové mřížky příměsovým atomem je možné vytvořit polovodiče s přebytkem elektronů (polovodiče typu N) nebo přebytkem děr (polovodič typu P). V polovodičích typu N se přidáním atomů donorů do původního polovodičového materiálu výrazně zvýší počet záporných nosičů ve vodivostním pásu. V polovodiči typu P se přidáním akceptorů do polovodičového materiálu výrazně zvýší počet kladných nosičů ve valenčním pásu, jak je ilustračně zobrazeno na Obr. 1.5. K původní vlastní vodivosti polovodiče, elektronové a děrové, se přidá i nevlastní vodivost příměsí. Pokud budou v kontaktu oba dotované polovodiče, bude v blízkosti spoje docházet k difuzi majoritních nosičů a vzniku difuzního proudu. Elektrony z polovodiče typu N budou difundovat do polovodiče typu P, kde budou rekombinovat s kladnými akceptorovými ionty a díry z polovodiče typu P budou difundovat do polovodiče typu N, kde budou rekombinovat se zápornými donorovými ionty. V blízkosti spoje, v důsledku nevykompenzovaných iontů donorů a iontů akceptorů, vznikne prostorový náboj a elektrické pole omezující další tok majoritních nosičů. Současně bude docházet k pohybu minoritních nosičů a vzniku driftového proudu kompenzujícího difuzní proud majoritních nosičů.

² V literatuře se objevují různá označení: termoelektrická dvojice, termoelektrický článek nebo zkráceně termočlánek. Označení termočlánek je dále v textu užívaný pouze pro označení kovových termoelektrických dvojic používaných pro měření teplot.



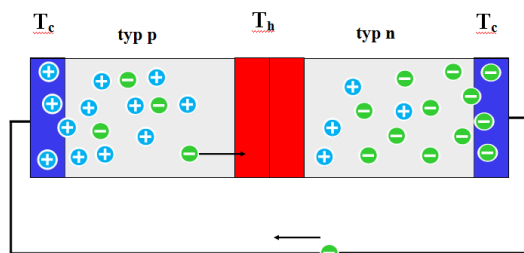
Obr. 1.5 Vznik kontaktního napětí na rozhraní polovodičů typu P a N

Přivedením tepla do oblasti spoje dojde v teplejších koncích vlivem excitací nosičů do vodivostních pásů polovodičů ke zvětšení koncentrace majoritních nosičů náboje a jejich kinetické energie. Majoritní nosiče následně budou difundovat ve směru teplotního gradientu k chladnějším koncům polovodičů. Difuze v tomto směru bude větší než v opačném směru. Difuzní tok odnášející nositele náboje k chladnějším stranám bude vytvářet mezi konci vodičů rozdíl potenciálů. Budou-li nositeli náboje elektrony, chladnější strana polovodiče se bude nabíjet záporně, teplejší kladně. V případě děr tomu bude naopak. Polovodiče typu N tak mají záporný Seebeckův koeficient a polovodiče typu P kladný Seebeckův koeficient. Tento objemový jev je zdrojem termoelektrického napětí v polovodičích. Vzniklý difuzní proces uvnitř polovodiče bude vyvolávat elektrické pole, které bude působit proti dalšímu pohybu nosičů. V okamžiku rovnováhy, kdy bude difuzní tok nosičů rovný reverznímu toku nosičů vniklému v důsledku potenciálového rozdílu, bude rozdíl teplot mezi konci vodiče vyvolávat Seebeckovo napětí:

$$V_p = \alpha_p(T_h - T_c), \quad (1.8)$$

$$V_n = -\alpha_n(T_h - T_c). \quad (1.9)$$

Rychlosti elektronů difundujících z teplejšího konce budou větší než rychlosti elektronů pohybujících se v opačném směru. Nebude docházet k přenosu náboje, bude ale probíhat kontinuální přenos tepla ve směru teplotního gradientu. Seebeckovo napětí je svorkovým napětím. Po připojení zátěže (například odporu) se v důsledku elektrického pole budou nosiče náboje pohybovat v elektrickém vodiči driftovou rychlostí a kompenzovat v rovnovážném stavu proud difuzí, bude docházet k pohybu elektronů přes spoj a obvodem poteče elektrický proud, jak je vyobrazeno na Obr. 1.6.

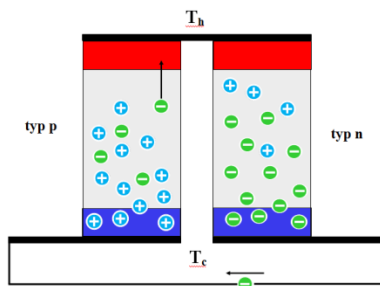


Obr. 1.6 Polovodičová termoelektrická dvojice jako zdroj elektrické energie

Největšího napětí dvojice bude dosaženo kombinací materiálů s velkým kladným a velkým záporným Seebeckovým koeficientem. Výsledné napětí pro jednu termoelektrickou dvojici je pak rovno:

$$V_{pn} = [\alpha_p - (-\alpha_n)](T_h - T_c) = (\alpha_p + \alpha_n)\Delta T = \alpha_{pn}\Delta T. \quad (1.10)$$

Na Obr. 1.7 je vyobrazena v současnosti nejběžnější geometrická konfigurace termoelektrické polovodičové dvojice tvořená podélnými polovodičovými sloupky čtvercového průřezu. Z hlediska vedení tepla jsou sloupky zapojeny paralelně, z hlediska vedení elektřiny sériově. Tato geometrická konfigurace bývá označována jako takzvaná Π -konfigurace, v případě tohoto provedení termoelektrické dvojice navíc označovaná jako takzvané „bulk“ provedení. Polovodiče pro tento klasický bulk typ termoelektrické dvojice jsou vyráběny mletím a sinteringem základních prvků za vysokých teplot, kdy jsou pomocí Bridgemanovy metody získány ingoty N a P polovodičů. Tyto ingoty jsou následně nařezány na wafery, vyleštěny a jsou na ně nadeponovány pomocí epitaxe z molekulárních svazků další vrstvy. Jedná se o difuzní bariéru a vrstvy kovů, které umožňují vytvoření elektrického a tepelného kontaktu. Wafery jsou následně nařezány na sloupky a tyto sloupky přidělány k elektricky nevodivým keramickým deskám se spojovacími kovovými vodiči, které vytváří elektricky vodivou cestu a současně přivádí, respektive odvádí teplo procházející sloupky. Seebeckův koeficient spojovacího můstku je malý, pro zjednodušení bývá uvažován jako nulový [12]. Takto sestavená termoelektrická dvojice může být použita pro přímou přeměnu tepla na elektřinu (generování elektrického proudu cíleným průchodem tepelného toku z vnějšího tepelného zdroje) anebo pro termoelektrické chlazení a ohřev (vyvození tepelného toku cíleným průchodem elektrického proudu z vnějšího elektrického zdroje). V závislosti na vnějších podmínkách jsou možné všechny tři provozní režimy.



Obr. 1.7 Polovodičová termoelektrická dvojice v Π -konfiguraci

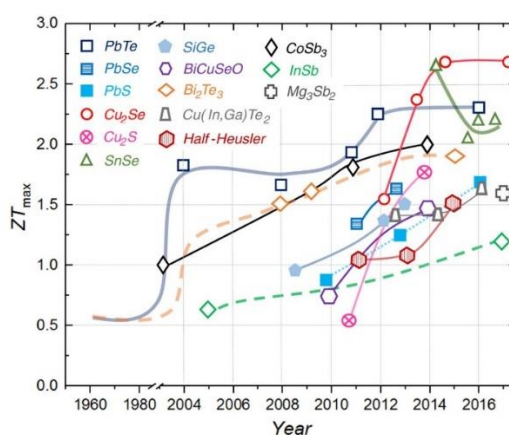
Při přeměně tepla na elektřinu je obvykle cílem se přiblížit buď maximální účinnosti přeměny, maximálnímu elektrickému výkonu anebo kompromisu mezi těmito stavy, případně jinému stavu. V případě termoelektrického chlazení je cílem získat co největší teplotní rozdíl mezi teplou a studenou stranou, co nejvyšší koeficient výkonnosti (COP) anebo kompromis mezi těmito stavy. V následujícím textu práce je věnován prostor přeměně tepla na elektřinu. Reverzní provozní režim termoelektrických

modulů, termoelektrické chlazení a termoelektrický ohřev nejsou, až na možné výjimky, dále v textu uvažovány. V nomenklatuře se pro strany termoelektrické dvojice i strany termoelektrického modulu a termoelektrického generátoru vžilo označení „teplá strana“ a „studená strana“, pro jejich teploty pak „teplota teplé strany“ a „teplota studené strany“. Toto značení je takto v dalším textu uváděno.

1.1.4. Termoelektrické materiály a účinnost termoelektrické přeměny

V materiálech s výraznými termoelektrickými vlastnostmi vyvolá rozdíl teplot tepelný tok a tok nábojů. Termoelektrina je výsledkem interference těchto dvou nevratných procesů, které vznikají simultánně. Termoelektrické materiály fungují jako termodynamické stroje. Vining [15] přirovnává výběr vhodných materiálů pro termoelektrickou přeměnu jako analogii k hledání vhodných pracovních látek pro mechanické tepelné stroje a zlepšování parametru zT analogii ke zlepšování termodynamických vlastností transportních látek. V obou systémech je entropie přenášena tekutinami. Funkci pracovní tekutiny v termoelektrickém oběhu přejímají elektrony, respektive Fermiho plyn. Ekvivalentem parciálního tlaku média v tepelných obězích je pak elektrochemický potenciál. Pokud se porovná termoelektrická přeměna s Carnotovým oběhem, přívod a odvod tepla není izotermický a přenos nosičů nábojů není adiabatický. Pohybem nosičů náboje materiálem dochází k vzájemným srážkám nosičů i srážkám s krystalovou mřížkou a dochází ke vzrůstu entropie. Vedle vedení tepla polovodiči je entropie produkována i Jouleovým teplem, které vzniká jako důsledek toku náboje. Peltierův a Seebeckův jev jsou vratnými ději, pro ty je produkce entropie nulová. K dalšímu vzrůstu entropie pak dochází i vlivem vedením tepla na přívodu a odvodu tepla – ve výměnících. Maximální účinnosti termoelektrické přeměny bude dosaženo při minimální produkci entropie na jednotku práce, při minimalizaci nevratných pochodů. Podle Shermana a spol. [16] tohoto stavu bude dosaženo při optimálním zátěžném odporu a optimální volbě poměru průřezu a délky polovodičových sloupků [6; 7].

Za vhodné termoelektrické materiály jsou většinou považovány materiály se $zT \geq 0,5$ [1]. Mezi tradiční termoelektrické materiály použitelné pro termoelektrickou přeměnu se řadí telurid bismutitý (Bi_2Te_3), slitiny teluridu olovnatého (PbTe) a slitiny křemíku s germaniem (SiGe). Známých materiálů je ale výrazně více. Je možné je rozdělit do několika skupin na: chalkogenidy, skutterudity, half-Heuslerské slitiny, zintl fáze, klatráty, silicidy, oxidy různých prvků nebo další materiály. Stručný přehled termoelektrické účinnosti vybraných termoelektrických materiálů, které bylo dosaženo v průběhu posledních desetiletí, je vyobrazený na Obr. 1.8. Detailnější přehled termoelektrických materiálů, včetně jejich materiálových parametrů, je možné nalézt například v [17].



Obr. 1.8 Časová osa dosahovaných hodnot bezrozměrného koeficientu termoelektrické účinnosti různých skupin termoelektrických materiálů [14]

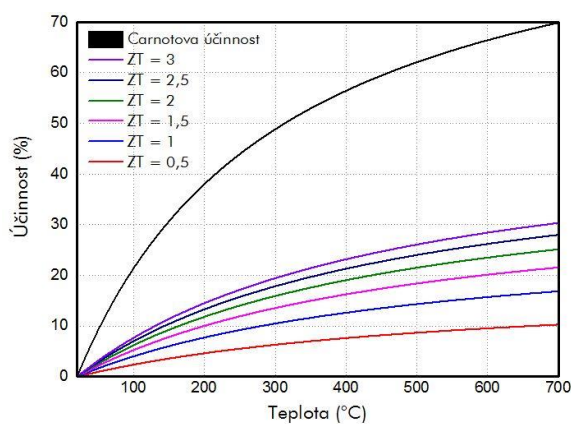
V závislosti na parametru zT se bude odvíjet výsledná tepelná účinnost přeměny. Průběh jejího maxima je zobrazený na Obr. 1.9. Tuto maximální tepelnou účinnost termoelektrické přeměny je možné spočítat podle vztahu odvozeného z takzvaného standardního CPM modelu:

$$\eta_{max} = \frac{T_h - T_c}{T_h} \cdot \frac{\sqrt{1 + Z\bar{T}} - 1}{\sqrt{1 - Z\bar{T}} + \frac{T_c}{T_h}}, \quad (1.11)$$

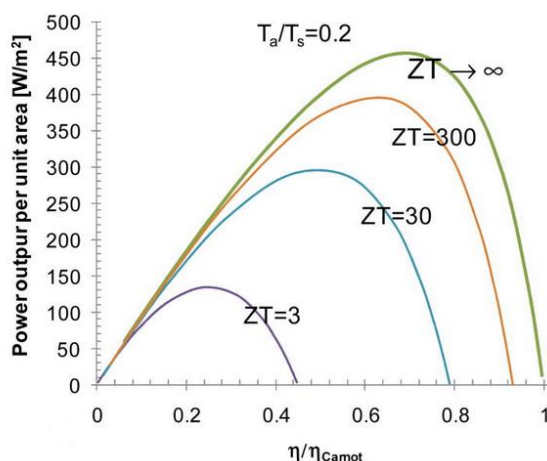
kde \bar{T} je střední provozní teplota

$$\bar{T} = \frac{T_h + T_c}{2}. \quad (1.12)$$

Na Obr. 1.10 je pak vyobrazený předpokládaný průběh výkonů v závislosti na velikosti koeficientu termoelektrické účinnosti.



Obr. 1.9 Průběh účinnosti termoelektrické přeměny při uvažování konstantního bezrozměrného koeficientu termoelektrické účinnosti [18]



Obr. 1.10 Dosahované výkony v závislosti na velikosti bezrozměrného koeficientu termoelektrické účinnosti [19]

Průběh účinnosti přeměny na Obr. 1.9 je zavádějící, protože pro vykreslení grafu se předpokládá konstantní ZT . Ve skutečnosti je účinnost termoelektrických materiálů výrazně závislá na teplotě. A liší se

u polovodičů typu P a typu N. Ve většině případů je možné maximální účinnosti dosáhnout jen ve velmi malém pásmu pracovních teplot. Materiály se proto dělí do teplotních skupin podle přibližného maxima jejich účinnosti na termoelektrické materiály: nízkoteplotní (< 500 K), středněteplotní (< 800 K) a vysokoteplotní. Nejpoužívanějšími materiály v průmyslu jsou nízkoteplotní Bi_2Te_3 materiály, které poskytují dobrou účinnost a nacházejí široké uplatnění v chladicí technice.

Při hodnocení termoelektrických materiálů se vedle jejich výkoností sleduje ekonomická nákladnost výroby a environmentální aspekt. Termoelektrické materiály, které vykazují dobrou termoelektrickou účinnost, obsahují z velké části prvky Sb, Te a Bi, které mají omezenou dostupnost [17]. V případě PbTe, které je dalším čteně vyžívaným materiálem dosahujícím výrazných termoelektrických účinností, navíc představuje z pohledu směrnic EU problém přítomnost toxického olova. Vlivem Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2011/65/EU „o omezení používání některých nebezpečných látek v elektrických a elektronických zařízeních“, takzvané směrnice RoHS týkající se elektrických a elektronických zařízení, dochází k omezování používání sloučenin obsahujících olovo. Vedle těchto materiálů stojí řada jiných potenciálně vhodných materiálů, například silicidy, half-Heuslerovské slitiny nebo oxidy prvků [14; 17]. Nejsou ale zatím dostupné v takové míře jako dříve zmíněné materiály, navíc v podobě běžně komerčně produkováných termoelektrických modulů. Jejich použitelnost pro konstrukce termoelektrických generátorů a mikrokogeneračních jednotek je limitovaná.

1.1.5. Matematický popis termoelektrické dvojice

Termodynamický popis termoelektrického systému pouze na základě vzájemných vztahů Seebeckova, Peltierova a Thomsonova jevu není dostačující, protože zanedbává nevratné procesy způsobené vedením tepla, Jouleovým teplem a ztrátami do okolí, které mají na účinnost přeměny dominantní vliv [20]. V současnosti akceptovaný popis termoelektrických jevů vychází z popisu nerovnovážných termodynamických procesů v izotropních látkách a teorie, která byla postupně formována od 30. let minulého století. V roce 1930 Onsager zavedl popis lineárních nerovnovážných (ireverzibilních) termodynamických procesů, který je založený na tzv. Onsagerově teorému reciprocit. Popis pochodu je provedený pomocí zobecněných sil, toků a produkce entropie. Na tuto práci navázal v roce 1948 Callen [21], který prezentoval termodynamickou teorii termoelektrických jevů v izotropních látkách. Detailnější popis následně provedl Groot. Takzvaný Onsager-de Groot-Callenův model je nazývaný první aproximací teorie transportu v termoelektrických materiálech, která dává koherentní termodynamický popis termoelektrických procesů na fenomenologické úrovni. V souvislosti s tím byl zaveden i pojem entropie na nosič náboje. V roce 1954 následně Domenicali [22] odvodil diferenciální rovnici (1.13) popisující rozložení teploty v izotropním vodiči, kterým prochází elektrický proud. Postupný vývoj termodynamického pohledu a související popis termoelektrických jevů v širším pohledu je uveden v [23].

Termoelektrické materiály jsou obvykle pevné krystalické látky, které vykazují anizotropní vlastnosti. Jejich materiálové parametry jsou prostorově a teplotně závislé, souvisí s chemickou strukturou a stavbou krystalové mřížky. Koeficient termoelektrické účinnosti může v různých krystalografických rovinách nabývat odlišných hodnot [5]. Pro potřeby dalšího popisu se předpokládají chemicky homogenní vlastnosti termoelektrických materiálů. Domenicaliho rovnice energetické bilance a rovnice tepelného toku pro izotropní materiály s teplotně závislými parametry při ustálených podmínkách ve vektorové notaci [6] má tvar:

$$\nabla \cdot (-\lambda \nabla T) = qj^2 - \tau_j \cdot \nabla T, \quad (1.13)$$

kde ϱ je rezistivita, j proudová hustota, součin ϱj^2 vyjadřuje Jouleovo teplo a $\tau = T \frac{d\alpha}{dT}$ je Thomsonův koeficient. Po úpravě přejde rovnice (1.13) do tvaru:

$$\nabla \cdot (-\lambda \nabla T) = \varrho j^2 - jT \frac{d\alpha}{dT} \cdot \nabla T. \quad (1.14)$$

Jedná se o prostorovou úlohu vedení tepla. Uvažováním zjednodušení je možné ji převést na řešení 1D úlohy. Je možné předpokládat, že tepelný tok a elektrický proud budou přenášeny současně a v jedné ose, předpokládá se také konstantní proudová hustota. Rovnice tepelné bilance (1.14) pak při ustálených podmínkách přejde do tvaru:

$$\lambda(T) \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{d\lambda}{dT} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 - jT \frac{d\alpha}{dT} \frac{\partial T}{\partial x} = - \frac{j^2}{\sigma(T)}. \quad (1.15)$$

Je možné přijmout další zjednodušení. Materiálové parametry α , σ , κ jsou obecně závislé na teplotě. Pokud ale není rozdíl teplot příliš vysoký, je možné teplotní závislost materiálových parametrů zanedbávat a uvažovat je jako konstantní. Uvažováním konstantního Seebeckova koeficientu se zanedbává vliv Thomsonova jevu. Rovnice tepelné bilance (1.15) se tak zjednoduší do tvaru:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = - \frac{j^2}{\sigma \lambda} = konst. \quad (1.16)$$

Rovnice (1.16) může být řešená integrací s použitím buď okrajových podmínek 1. druhu (teploty) nebo smíšenými okrajovými podmínkami 1. druhu a 2. druhu (kombinace Dirichletovy a Neumannovy podmínky, tepelný tok a teplota). Obvyklé je použití okrajových podmínek 1. druhu³:

$$T(x) = T_C + (T_H - T_C) \frac{x}{L} + \frac{j^2}{2\sigma\lambda} x(L-x), \quad (1.17)$$

kde

$$T = T_C (x = 0), T = T_H (x = L). \quad (1.18)$$

Pokud obvodem neprotéká proud, teplotní profil je přímkový. Pokud proud obvodem protéká ($j \neq 0$), teplotní profil uvnitř sloupku má parabolický charakter. Zakřivení teplotního profilu způsobuje Jouleovo teplo generované uvnitř sloupku. Tento analytický výpočet je základem takzvaného CPM (Constant Parameter Model nebo Constant Properties Model) modelu, který se používá pro stanovení výkonnostních parametrů termoelektrických modulů [6].

CPM model

Nejběžnější model popisující toky uvnitř polovodičové dvojice je takzvaný CPM model, v literatuře označovaný také jako standardní model, případně pro své zjednodušení jako „ideální“ [1] model. Tento 1D analytický model odvodil Ioffe [7] při analýze a výpočtu účinnosti přeměny termoelektrické dvojice.

³ Termoelektrické aplikace, ve kterých je možné uvažovat konstantní tepelný tok zdroje tepla, jsou aplikace s jadernými tepelnými zdroji (radioizotopové termoelektrické generátory) nebo aplikace využívající solární energie [6].

Je to nejstarší a pravděpodobně nejpoužívanější model, který je hojně využíván i v průmyslu. Uvažuje konstantní materiálové parametry nezávislé na teplotě, zanedbává tepelné i elektrické ztráty. Je odvozený pomocí Peltierova tepla, tepla kondukcí a Jouleova tepla. Následující popis vychází ze zdrojů [1] [7], [6].

V popisu a vzorcích, které budou následovat, jsou uváděné veličiny, které je potřeba definovat. Hustota proudu uvnitř sloupků je daná průřezem sloupků A (m²) a velikostí proudu I (A), který sloupkem prochází:

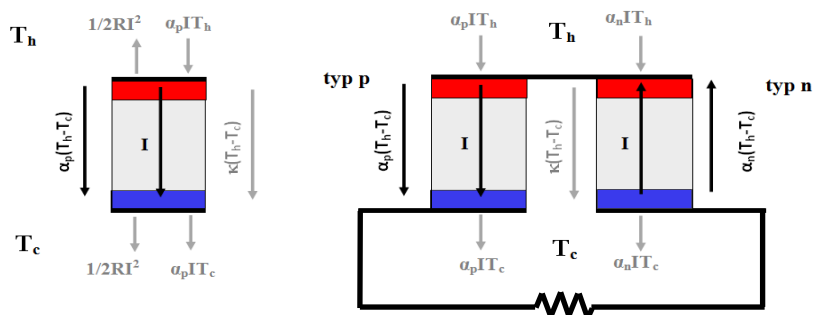
$$j = \frac{I}{A}. \quad (1.19)$$

Elektrický odpor termoelektrické dvojice R (Ω) je definovaný rezistivitou použitého termoelektrického materiálu ρ ($\Omega \cdot m$), délkou sloupku L (m) a velikostí průřezu sloupku. Popis je prováděn pro termoelektrickou dvojici. Tu tvoří sloupky dva, v čitateli zlomku se proto objevuje součet odporů. Analogicky je pak definována i tepelná vodivost termoelektrické dvojice K (Wm⁻¹K⁻¹):

$$R = \frac{2\rho L}{A}, \quad (1.20)$$

$$K = \frac{2\lambda A}{L}, \quad (1.21)$$

Elektrické a tepelné toky uvnitř termoelektrické dvojice, tak je uvažuje model CPM, jsou vyobrazené na Obr. 1.11. Pokud je mezi teplou a studenou stranou termoelektrické dvojice udržován stálý rozdíl teplot $\Delta T = T_h - T_c$, teplotní rozdíl vybudí svorkové elektrické napětí $V_0 = V_{pn}$, které je rovné Seebeckovu napětí uváděnému v rovnici (1.10). Pokud je k termoelektrické dvojici připojena elektrická zátěž R_L , průchodem tepelného toku termoelektrickým materiálem vzniká elektrický proud, který má za následek vznik Jouleova tepla. Množství Jouleova tepla generovaného uvnitř sloupků po jejich délce lineárně roste a je přenášeno vedením tepla, symetricky k teplé a studené straně sloupků. Peltierův jev na hranici teplé strany absorbuje část přiváděného tepla a uvolňuje ho na hranici studené strany. Zbylé přiváděné teplo je z teplé strany přenášeno kondukcí ke studené straně. Na hranici studené strany se Peltierovo teplo uvolňuje a musí být spolu s veškerým teplem kondukcí studené straně permanentně odváděno. Termoelektrická dvojice přeměňuje tepelnou energii na elektrickou a dodává výkon P .



Obr. 1.11 Znáznornění elektrických a tepelných toků uvnitř termoelektrického sloupku (vlevo) a uvnitř termoelektrické dvojice (vpravo)

Model předpokládá, že přívod a odvod tepla je izotermický a podmínky adiabatické. Veškeré přiváděné teplo je přenášeno pouze sloupky a teplo, které neprojde, se přemění na elektrinu. Neuvažují se parazitní

tepelné ztráty. Vedení tepla okolním prostředím, konvekce, radiace ani další tepelné ztráty a odpory uvažovány nejsou. Materiálové parametry (α , ρ , k) sloupků, jak bylo zmíněno, jsou uvažovány jako nezávislé na teplotě. Předpokládá se, že oba termoelektrické sloupky mají stejné geometrické parametry, stejně velké průřezy, které se po výšce polovodičů nemění a stejné délky. Termofyzikální vlastnosti polovodičů P a N se uvažují shodné, s výjimkou Seebeckova koeficientu, který je uvažovaný stejně velký pro oba typy polovodičů, ale opačného znaménka. Seebeckův koeficient spojovacích vodičů se předpokládá nulový. Předpokládá se také rezistivní zátěž přizpůsobená vnitřnímu odporu termoelektrické dvojice. Pak je možné tepelné toky na hranicích teplé a studené strany polovodičové dvojice vyjádřit jako:

$$\dot{Q}_h = \alpha_{pn} T_h I - \frac{1}{2} R I^2 + K(T_h - T_c), \quad (1.22)$$

$$\dot{Q}_c = \alpha_{pn} T_c I + \frac{1}{2} R I^2 + K(T_h - T_c). \quad (1.23)$$

Elektrický výkon termoelektrické dvojice je získaný z rozdílu tepelných toků:

$$P = \dot{Q}_h - \dot{Q}_c = \alpha_{pn} I(T_h - T_c) - R I^2 = R_L I^2. \quad (1.24)$$

Elektrické napětí, proud, výkon i účinnost jsou závislé na zátěžném odporu. Elektrický proud I termoelektrické dvojice z rovnice (1.24) může být vyjádřený jako:

$$I = \frac{\alpha_{pn}(T_h - T_c)}{R_L + R}. \quad (1.25)$$

Účinnost přeměny η je dána podílem elektrického výkonu a přiváděného tepla:

$$\eta = \frac{P}{\dot{Q}_h} = \frac{\alpha_{pn} I(T_h - T_c) - R I^2}{\alpha_{pn} T_h I - \frac{1}{2} R I^2 + K(T_h - T_c)}. \quad (1.26)$$

Elektrické napětí, proud, výkon i účinnost jsou závislé na zátěžném odporu, respektive poměru vnitřního odporu a zátěžného odporu. Tento poměr proto bývá označován samostatným identifikátorem m :

$$m = \frac{R_L}{R}. \quad (1.27)$$

Elektrický proud I může být vyjádřen jako funkce zátěžného odporu R_L a zátěžného poměru:

$$I = \frac{V_0}{R + R_L} = \frac{V_0}{R(1 + m)}. \quad (1.28)$$

Elektrický výkon je možné zapsat ve tvaru funkce elektrického proudu, napětí, odporu zátěže nebo odporu modulu:

$$P = \frac{V_0^2}{R} \frac{m}{(1 + m)^2} = \frac{\alpha_{pn}^2 (T_h - T_c)^2}{R} \frac{m}{(1 + m)^2}. \quad (1.29)$$

Účinnost přeměny vyjádřená jako funkce zátěžného odporu je dána vztahem:

$$\eta = \frac{P_{el}}{Q_h} = \frac{T_h - T_c}{T_h} \frac{m}{m + 1 + \frac{(1+m)^2}{ZT_h} - \frac{1}{2} \frac{T_h - T_c}{T_h}} = \eta_C \eta_R. \quad (1.30)$$

Účinnost termoelektrické přeměny je podle vzorce (1.30) daná provozními teplotami a materiálovými parametry. Je možné ji tak vyjádřit jako součin Carnotovy účinnosti a podílu, ve kterém vystupuje koeficient termoelektrické účinnosti Z . Tento zlomek bývá v literatuře, např. [1; 5; 6] označován jako takzvaná redukovaná účinnost nebo také faktor nevratnosti.

Termoelektrická dvojice dodává výkon, pouze pokud je připojena elektrická zátěž. Výkonové parametry jsou na zátěžném odporu závislé. Dvěma specifickými zátěžným poměrům odpovídá stav, při kterém je možné dosáhnout termoelektrické přeměny s maximální účinností (1.32) nebo termoelektrické přeměny s maximálním výkonem (1.31). Každému z těchto dvou stavů odpovídá jiná optimální velikost zátěžného odporu. Provozu s maximální účinností bude dosaženo, když zátěžný poměr bude nabývat hodnoty:

$$m_\eta = 1. \quad (1.31)$$

Účinnost η pak bude nabývat maxima $\eta = \eta_{max}$, které je možné spočítat podle vztahu uvedeného ve vzorci (1.11). Maximálního výkonu bude dosaženo, když zátěžný poměr bude roven:

$$m_P = \sqrt{1 + Z\bar{T}}. \quad (1.32)$$

Při tomto zátěžném poměru bude elektrický výkon nabývat maximální hodnoty $P = P_{max}$

$$P_{max} = \frac{\alpha_{pn}^2 (T_h + T_c)^2}{4R} = \frac{1}{4} \frac{V_0^2}{R_{in}}. \quad (1.33)$$

Obou maxim současně na termoelektrické dvojici s konkrétní geometrií a jednou konkrétní velikostí zátěžného poměru není možné dosáhnout [6]. Volba zátěžného poměru, respektive zátěžného odporu je součástí takzvaného elektrického přizpůsobování (electrical matching), které je jednou z podmínek dosažení optimálních výkonových parametrů.

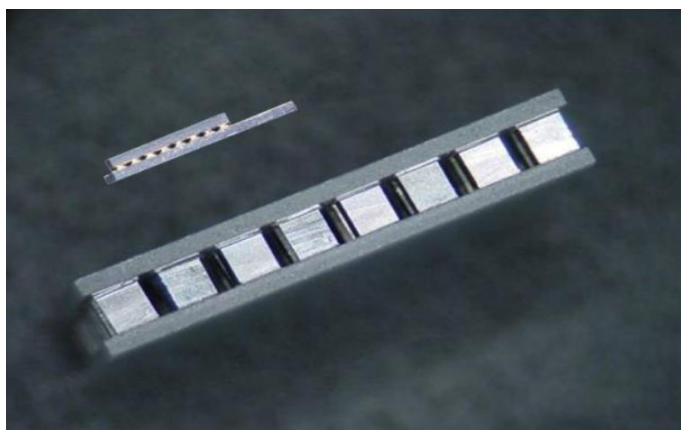
Standardní popis termoelektrického modulu je idealizovaný. Popis podle modelu CPM neuvažuje tepelné a elektrické kontaktní odpory uvnitř termoelektrického modulu, tedy ani keramické desky termoelektrického modulu. Přestože CPM přijímá mnohá zjednodušení a geometrická (výkonová) optimalizace modulů podle tohoto modelu je zatížena značnou chybou [24], podle Goupila a spol. [6] a dalších význačných autorů je model považován jako dobrá počáteční aproximace při návrhu termoelektrického systému. Jednodimenzionálních analytických modelů popisujících termoelektrické moduly existuje více. Dalším čteně využívaným modelem je takzvaný realistický model, odvozený Minem a Rowem [25]. Na rozdíl od CPM modelu uvažuje kontaktní elektrické a tepelné odpory a vliv keramických desek. Dalším ze známých analytických modelů je model Sandoz-Rosada [26], který rozšiřuje CPM model o parazitní tepelné ztráty vzduchovou mezerou nebo model, který bere v potaz i Thomsonův jev. Mezi analytické modely uvažující Thomsonův jev se řadí dále model Chena a spol. [27] nebo model Freuneka a spol. [28]. Freunekův model vyjma Thomsonova jevu uvažuje i přechodové

odpory na keramice a elektrických spojích. Všechny tyto modely zanedbávají některé materiálové vlastnosti.

Odvození pro teplotně závislé parametry bylo prvně prezentováno Shermanem a spol. [16], kteří prezentovali řešení rovnic (exaktní a numerické) s teplotně závislými materiálovými parametry.

1.2. Termoelektrické moduly

Dosahované elektrické výkony získané přeměnou tepla pomocí jedné termoelektrické dvojice jsou pro praktické využití obvykle velmi malé. Pro dosažení většího elektrického napětí a výkonu jsou termoelektrické dvojice spojovány do sérií a tvoří větší celky, termoelektrické moduly. Ty byly zmiňované i v předchozím textu. Na Obr. 1.12 je možné vidět jejich reálnou podobu. Termoelektrické dvojice bývají zpravidla opatřeny keramickými deskami z Al_2O_3 , které zajišťují elektrickou izolaci od okolí a měly by zajišťovat i mechanickou integritu. Stejně jako u samostatné termoelektrické dvojice je teplo přiváděno paralelně všem polovodičovým sloupkům, z hlediska vedení elektřiny jsou dvojice zapojeny v sérii. Geometrie termoelektrických modulů mohou být různé. Vedle klasických termoelektrických dvojic v Π -konfiguraci existuje i řada jiných méně obvyklých uspořádání, které se ale až na výjimky (využití například v experimentálních automobilových termoelektrických generátorech) v reálném provozu zatím obvykle nevyskytují. Komerční bulk termoelektrické moduly v Π -konfiguraci bývají v literatuře označovány jako takzvané „předem sestavené“ termoelektrické moduly.



Obr. 1.12 Srovnání velikostí konvenčního bulk provedení termoelektrického modulu s thin film provedení termoelektrického mikromodulu [29]

Pro potřeby optimalizace uváděné v experimentální části práce je potřeba definovat i parametr, který vyjadřuje poměr plochy termoelektrického materiálu k celkové ploše termoelektrického modulu nebo generátoru, takzvaný faktor plnění:

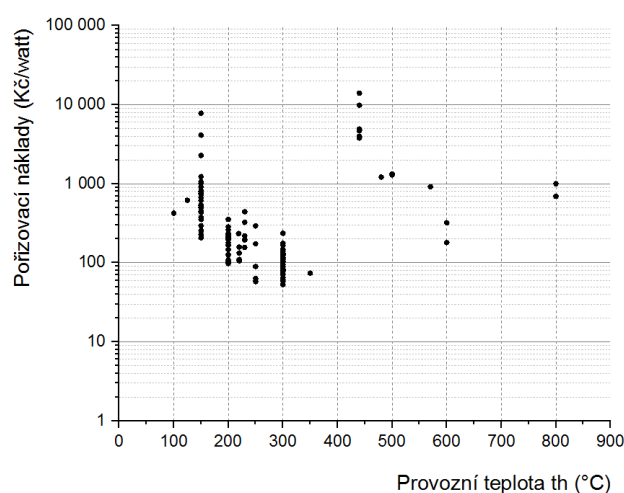
$$F = \frac{2A_{te}N}{A_{celk}}, \quad (1.34)$$

kde A_{te} (m^2) vyjadřuje plochu, kterou zaujímají polovodičový sloupek termoelektrické dvojice, N (-) je počet termoelektrických dvojic a A_{celk} (m^2) vyjadřuje velikost kontaktní plochy modulu. Faktor plnění nabývá v termoelektrických modulech určité hodnoty, která souvisí s mechanickou pevností, ale i například požadavkem na velikost výstupního napětí.

1.2.1. Parametry komerčně dostupných termoelektrických modulů

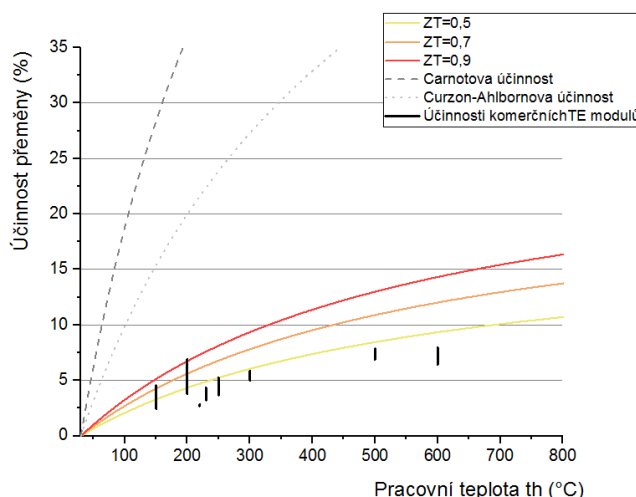
Větší část průmyslově dostupných termoelektrických modulů jsou nízkoteplotní TE moduly obsahující v různém procentuálním zastoupení Bi a Te, případně jiné prvky. Jejich obvyklá maximální krátkodobá teplota je přibližně 230 °C (na teplé straně). Podmnožinu nízkoteplotních BiTe modulů tvoří moduly určené primárně pro chlazení, v České republice často označované jako Peltierovy články⁴. Čistě chladičí Peltierovy termoelektrické moduly se v jednom případě objevily i v experimentálním generátoru zahrnutém ve výčtu termoelektrických generátorů v domovních aplikacích. Využití Peltierových článků je zamýšleno primárně pro chladičí techniku. Materiál použitých pájek má nižší teplotu tavení a omezuje tím maximální provozní teplotu, která souvisí s účinností přeměny a dosažitelným výkonem. Tyto typ termoelektrických modulů tak nebude nalézat uplatnění v aplikacích se spalovacími zařízeními.

Byla provedena rešerše dostupných termoelektrických modulů od vybraných komerčních výrobců, případně prodejců [30-40]. Cílem bylo vzájemně porovnat parametry běžně dostupných nízkoteplotních modulů. Výsledky jsou prezentované na následujících obrázcích, které srovnávají pořizovací náklady termoelektrických modulů (Obr. 1.13) a jejich dosahované účinnosti (Obr. 1.14). Hodnoty uváděné na Obr. 1.13 jsou uváděny při optimálních podmínkách, za cenu 1 kusu bez množstevních slev a s kurzem platným v červenci roku 2019. Provozní teplota (osa x) je teplota, které má být podle výrobců termoelektrických modulů dosaženo na teplé straně modulů.



Obr. 1.13 Pořizovací cena termoelektrických modulů v závislosti na maximální provozní teplotě termoelektrických modulů

⁴ Rozdělení na generátorové a chladičí termoelektrické moduly je zavádějící. V principu jsou moduly totožné. Liší se především materiály použitých pájek. Je to dáno očekávanými provozními teplotami. Termoelektrické moduly určené primárně pro chlazení se mohou vyskytovat v generátorových aplikacích, pokud to umožňuje rozsah provozních teplot pájených spojů. Typicky se chladičí mikromoduly uplatňují v energy harvesting aplikacích, kde bývají provozní teploty blízké běžným okolním teplotám a kde se dosahované výkony při přeměně tepla na elektřinu pohybují obvykle do řádu mW.

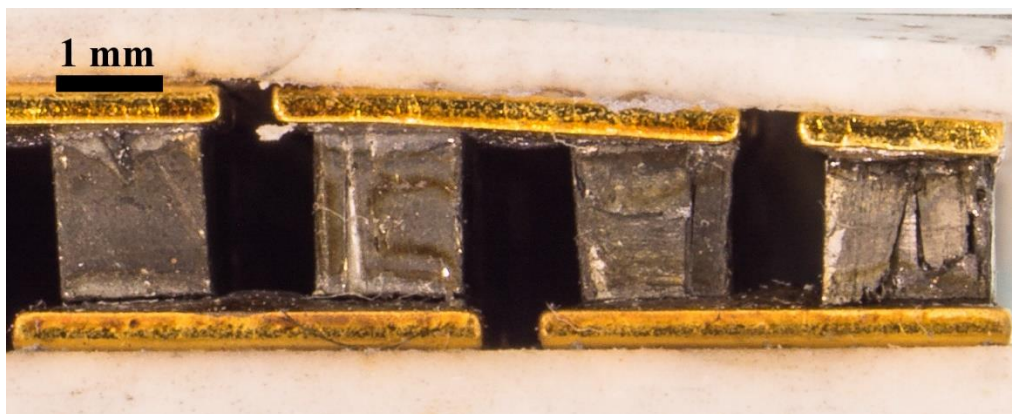


Obr. 1.14 Účinnost termoelektrické přeměny vybraných termoelektrických modulů provozovaných při optimálních provozních teplotách

1.2.2. Mechanické namáhání termoelektrických modulů

Termoelektrické moduly jsou za provozu značně namáhané. Vlivem velkých rozdílů teplot mezi keramickými deskami a rozdílným roztažnostem dochází za provozu ke vzniku napětí a deformací uvnitř modulu. Průhyb modulu může způsobit i destrukci polovodičových sloupků. Maximální velikost bulk termoelektrického modulu je proto z praktických důvodů omezena na jednotky centimetrů, Hodes [41] uvádí rozměry přibližně 5 cm x 5 cm. Vedle namáhání vlivem teplot je citelné i namáhání vlivem tlaku. Aby termoelektrické moduly generovaly elektrický výkon, je potřeba zajistit odpovídající tepelný tok. Musí být minimalizované tepelné kontaktní odpory a zajištěn dobrý tepelný kontakt modulů s výměníky. Aby došlo k minimalizaci přechodových odporů kontaktních vrstev, jsou moduly a ostatní mechanické komponenty generátoru silově namáhané. Výrobci modulů udávají velikost doporučených tlaků v rozmezí 0,5 MPa až 1,4 MPa [42-44]. Termoelektrické moduly jsou relativně pevné a snášejí tlakové namáhání, špatně ale odolávají namáhání na střih. Nevhodně zvolené upnutí modulů v kombinaci s nerovnoměrným stlačením modulů způsobené rozdílným krouticím momentem šroubových spojů nebo hrubými styčnými plochami dokáží vyvolat značné sřížné síly a planární modul vážně poškodit.

Vlivem nevhodně zvolené konstrukce experimentálního termoelektrického generátoru, uváděného dále v praktické části práce, došlo u několika termoelektrických modulů v průběhu experimentů k poškození jejich polovodičových sloupků a vzniku prasklin, které jsou zřetelně vidět na jejich vnějším okraji. Na detailním pohledu (viz Obr. 1.15) je možné vidět celé spektrum typů poškození. Od prasklin na spojích polovodičů s kovovými můstky ve spodní levé části snímku a praskliny horní krycí keramické desky v horní části, přes deformace polovodičových sloupků i kovových můstků až po puknutí pravého krajního sloupku vlivem nadměrného stlačení. Deformace byly pravděpodobně způsobeny nedostatečnou rovinností kontaktních ploch, nerovnoměrným dotahováním výměníku/chladiče k termoelektrickým modulům a zhroutením opěrného bodu. U jednoho termoelektrického modulu došlo i k úplnému poškození a přerušení vodivých drah.



Obr. 1.15 Pohled na poškozený termoelektrický modul

Vlivem poškození modulů se změnil vnitřní odpor termoelektrických modulu a v důsledku toho i koeficient termoelektrické účinnosti a došlo k poklesu výkonových parametrů modulů za provozu. Vystala tak potřeba sledovat stav modulů a znát blíže jejich parametry. V návaznosti na to byl zvažován možný způsob kontroly termoelektrických modulů.

1.2.3. Měření parametrů termoelektrických modulů

Měření parametrů samostatných polovodičových materiálů je svázané s průmyslovou produkcí termoelektrických materiálů a je relativně běžné. Pro měření Seebeckova koeficientu a elektrického odporu polovodičových sloupků existují komerčně dostupné laboratorní měřicí přístroje, např. Ulvac ZEM-3, Linseis LSR3, Fraunhofer IPM-ZT-Meter-870K nebo IPM-SRX-900K, Netzsch SBA 458 Nemesis, Temte ZT-Scanner, aixACCT Systems/DLR Comtesse-System a jiné. Podobně pak měření tepelné vodivosti sloupků, např. přístroji firmy Netzsch. Měřicí přístroje pro měření parametrů termoelektrických modulů jako celků tak široce dostupné nejsou. Měření pomocí Harmanovy metody umožňuje Z-meter DX4085 až DX4190 a měření prostřednictvím široce používané steady-state metody je možné pomocí přístroje Ulvac-Riko PEM-2 [45] a TEGeta PANCO GmbH [46]. Na akademických pracovištích bývá často obvyklá stavba vlastních měřících zařízení [24; 47-54]. Jak uvádí Bottner, souvisí to pravděpodobně s tím, že neexistuje standardizace postupů měření a vyhodnocování termoelektrických modulů, které by bylo ukotvené v mezinárodní normách ISO nebo normách EN, DIN, ASTM, ASME, apod. Jediná nalezená norma vztahující se k testování vlastností termoelektrických modulů je japonská norma JIS R 1650 (1-2:2002) v japonštině, která není k dispozici v jiném jazyce. Jiným důvodem, proč nejsou využívána na akademických pracovištích komerční testovací zařízení, může být jejich značná pořizovací cena.

V souvislosti s testováním termoelektrických modulů jsou v literatuře uváděny: Harmanova metoda [55; 56], modifikovaná Harmanova metoda [57], metoda steady-state, modifikovaná metoda steady-state, metoda rapid steady-state, metoda Gao Min [58; 59], impedanční spektroskopie, resp. měření odezvy na střídavý proud. Vedle těchto metod, jejichž cílem je u termoelektrických modulů zjistit celkový Seebeckův koeficient, tepelnou vodivost, elektrický odpor, účinnost přeměny a koeficient termoelektrické účinnosti, stojí cyklické tepelné zatěžování, které je využíváno pro predikci možné životnosti a spolehlivosti termoelektrických modulů [60-66]. V praktické části práce bylo navrženo a sestaveno měřicí zařízení pro zjišťování parametrů termoelektrických modulů, které využívá metody steady-state. Tato metoda proto bude blíže popsána.

Metoda steady-state

Steady-state metoda představuje simulaci podmínek blízkých reálnému provozu termoelektrických modulů. Zjišťovanými parametry jsou Seebeckův koeficient (na úrovni termoelektrického modulu), elektrický odpor, tepelná vodivost, koeficient ZT (na úrovni termoelektrického modulu měřený nepřímým způsobem), výkon modulu a účinnost termoelektrické přeměny. Měřením je postihnuty i vliv tepelných odporů keramických desek. Jedná se pravděpodobně o nejpřesnější metodu, která je čteně využívána a která by mohla být v budoucnu normována. Základem steady-state metody je udržování ustáleného tepelného toku skrz měřený termoelektrický modul a odečet jeho výkonových hodnot pro různé zátěžné odpory. Měří se současně tepelné toky na teplé a studené straně modulu nebo obojí, případně i tepelné ztráty. Rozdíl mezi tepelnými toky představuje elektrický výkon modulu.

Měřicích zařízení využívajících metody steady-state vznikla v nedávné době řada [47-54]. Je možné je rozdělit do dvou hlavních skupin podle způsobu měření tepelného toku, které je potřeba pro výpočet tepelné vodivosti modulu, respektive koeficientu ZT a účinnosti modulu. Nejčastěji je měření tepelného toku provedeno pomocí referenčního materiálu o známých termofyzikálních vlastnostech a měření teplotního rozdílu mezi dvěma místy po jeho délce. Z Fourierova zákona vedení tepla následně vyplývá hodnota tepelného toku. Referenční materiál bývá provedený jako zúžený blok o průřezu stejném, jako má měřený termoelektrický modul (předpokladem 1D vedení tepla). Měření může probíhat jednostranně nebo symetricky, viz Wang a spol. [67]. Vzhledem k měření malých teplotních diferencí jsou kladeny vysoké požadavky na kvalitu snímačů teploty. Na teplé straně modulu mohou být změřené hodnoty tepelného toku vlivem vysokých teplot a radiačních ztrát referenčního materiálu zatížené značnou chybou. Z pohledu zjišťování tepelných ztrát, jak uvádí Mahajan [68], je aparatury možné rozdělit do skupin, které tepelné ztráty buď zanedbávají, měří anebo se je aktivně snaží minimalizovat a následně měřit.

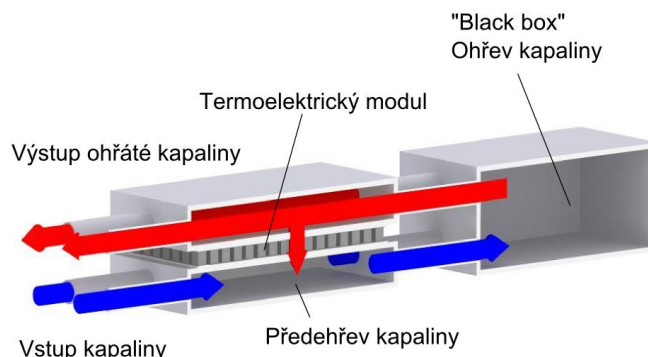
Jiným způsobem měření tepelného toku je takzvaná absolutní metoda měření tepelného toku, která vychází z normy ISO 8302 a takzvané Power Compensation kalorimetrie. Aby se minimalizovaly nejistoty měření, měří se tepelný tok procházející termoelektrickým modulem měřením příkonu elektrického topidla. Tento způsob měření prováděl například Rauscher a spol. [48], nebo von Lukowicz a spol. [54]. V případě této metody není potřeba používat referenční materiál a odpadá měření malých teplotních diferencí. Nezbytné je se ale vyhnout parazitním tepelným tokům. Měřicí topidlo musí být velmi dobře stíněné. Využívá se proto takzvaný guard heater. Modifikaci měření pak představuje symetrický způsob měření. Tímto způsobem provádí měření termoelektrických modulů například společnost Marlow Industries, viz Wang [67] nebo D'Angelo a spol. [69]. Symetrická měření vycházejí z norem pro měření tepelné vodivosti izolačních stavebních materiálů (normy ISO 8302, ASTM D5470-01, ASTM E1225-99 nebo obdobných).

1.3. Termoelektrické generátory

1.3.1. Konstrukce termoelektrických generátorů

Termoelektrický generátor může být tvořen i jediným termoelektrickým modulem, obvykle jsou ale generátory tvořeny větším množstvím termoelektrických modulů, které jsou pro dosažení požadovaného výkonu spojovány do větších celků. Další komponenty generátorů tvoří tepelné výměníky zajišťující přívod a odvod tepla. Vzhledem k účinnosti termoelektrické přeměny prochází větší část tepla skrze TE moduly bez užitku. V případě dodatečného využití odpadního tepla může mít aplikace termoelektrického systému negativní dopad na provoz vlastního tepelného zařízení. U zařízení produkujících teplo a elektřinu současně je možné podle Mina a Rowa [70] případný negativní vliv termoelektrického systému potlačit konstrukcí generátoru v takzvané parazitní aplikaci, viz Obr. 1.16.

Relativně nízká účinnost termoelektrické přeměny není tak významná. Je možné produkovat teplo i elektřinu současně, s malým vlivem nebo bez vlivu na výslednou účinnost tepelného systému [19]. Použití parazitních TEG je výhodou zejména v nízkovýkonových aplikacích, ve kterých není k dispozici zdroj elektrické energie nebo je dodávka elektřiny nestabilní.



Obr. 1.16 Schéma parazitní konfigurace termoelektrického generátoru [18]

1.3.2. Historický přehled aplikací termoelektrických generátorů

Termoelektrická zařízení a termoelektrické generátory byly konstruovány v souvislosti s postupným vývojem a náhledem na fyzikální podstatu termoelektrity. Termoelektrické moduly, které jsou předmětem této práce, se jako komponenty termoelektrických generátorů (v podobě, v jaké jsou popisovány v předchozích kapitolách práce), objevují až v pozdějších etapách vývoje. V příloze P1 na konci práce je uveden přehled nalezených termoelektrických generátorů a jejich parametrů. V přehledu je uveden obecně popis termoelektrických generátorů složených ať už z jednotlivých termoelektrických dvojic, nebo termoelektrických modulů. Nejříve z kovů, následně polovodičů, postupně tak jak probíhal vývoj v historických etapách.

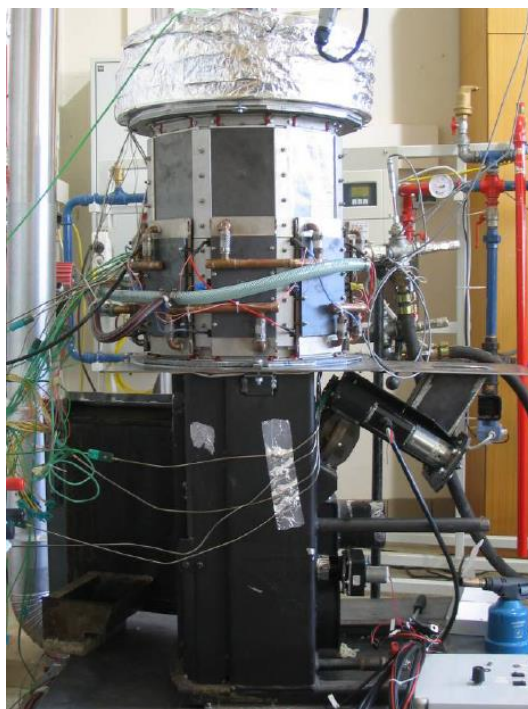
Pravděpodobně první zdokumentovaný termoelektrický generátor, který využíval termoelektrických jevů a sloužil pro výrobu elektřiny, sestavil C. Pouillet a vznikl v roce 1840 [71]. V roce 1860 H. Ruhmkorff zkonstruoval plynový generátor, následoval pak generátor využívající spalín ze spalování koksu, sestavený C. Clamondem v roce 1879. Ten dosahoval elektrického výkonu 192 W [72]. Clamondův generátor vykazoval problémy s životností, docházelo ke snižování jeho výkonu vlivem oxidace a degradace spojů dvojic namáhaných teplem, docházelo ke krystalizaci materiálů a zvětšování vnitřního odporu generátoru [73; 74]. Patrně prvním zdokumentovaným komerčním generátorem byl Gülcherův plynový termoelektrický generátor z roku 1889, jehož maximální účinnost přeměny dosahovala 0,5 % [20]. Další komerční generátor „Thermattaix“ byl uveden ve Velké Británii v roce 1925. Sloužil pro napájení rozhlasových přijímačů. Využíval plynového hořáku, chlazení generátoru zajišťoval okolní vzduch. Rowe [1] uvádí, že všechny tyto generátory byly sestaveny z kovových materiálů a měly velmi malou účinnost, méně než 1 %. V souvislosti s vývojem syntetických polovodičů se obecně přijalo za fakt, že kovy a kovové slitiny jako termoelektrické materiály nejsou vhodné pro hromadnou výrobu elektrické energie. Ve 30. letech minulého století vznikaly generátory na plyná paliva. Napomohly plynofikaci tím, že umožnily bezpečné zastavení přívodu plynu, viz patent Karrera [75] na bezpečnostní pojistku. V Sovětském svazu od 20. let minulého století probíhal výzkum polovodičových materiálů. Vedernikov a Iordanishvili [76] uvádí, že na konci druhé světové války měla sovětská armáda první experimentální polovodičové generátory, které sloužily pro napájení radiostanic. V civilním sektoru byl první komerční polovodičový generátor uveden v roce 1954. Využíval tepla petrolejových lamp a podobně jako Thermattaix se používal k napájení

rozhlasových přijímačů. Na konci 50. let byly zahájeny pokusy se solárními termoelektrickými generátory [77], které byly zvažovány jako zdroj elektrické energie ve vesmíru v době, kdy solární (fotovoltaické) technologie nebyly dostatečně rozvinuté. Jak vyplývá z odtajněného armádního informačního zdroje, zvažováno bylo i využití TEG jako zdroje elektřiny v balistických střelách [78]. Vývoj termoelektrických generátorů byl následně spjat s objevováním vesmíru, pokusy v medicínské fyzice a těžbou surovin v nehostinném prostředí. Od 60. let 20. století se ve vesmírných sondách začaly používat radioizotopové termoelektrické generátory, kterých NASA vyslala do dnešních dnů více než čtyři desítky a z nichž mnohé stále pracují. Jako zdroje tepla využívají pelet izotopů silných alfažáříčů ^{90}Sr , ^{210}Po nebo ^{238}Pu . Maximální dosahované elektrické výkony standardních radioizotopových generátorů byly přibližně 300 W [79]. V 60. letech se také objevují první pokusy a zvažování automobilových termoelektrických generátorů. Výraznější výzkum v této oblasti pokračoval až později. Na vývoj generátorů pro kosmické sondy navázaly generátory pro pozemní aplikace využívající již klasických fosilních paliv. Generátory o výkonech desítek až stovek wattů spalující plynná paliva se tak v současnosti už několik desetiletí používají jako zdroje elektrické energie v odlehlých oblastech, např. k monitorování prostředí, pro katodickou ochranu potrubních cest, v navigaci, pro napájení telekomunikačních sítí a dalších aplikacích.

V souvislosti s ropnou krizí v 80. letech se objevily snahy využívat odpadního tepla [1]. Jednou z dlouhodobých vývojových linií termoelektriky se následně staly dříve zmíněné automobilové aplikace. Vývoj automobilových termoelektrických generátorů v širším měřítku probíhá od 90. let do současnosti. Tyto aplikace jsou v současnosti spolu s „energy harvesting“ aplikacemi pravděpodobně nejzřetelnější hybnou silou aplikovaného vývoje. Cílem automobilových termoelektrických generátorů je využití energie paliva, která bez užítu odchází výfukovým potrubím a chladicí soustavou automobilu. První zdokumentovaný automobilový termoelektrický generátor byl sestaven v roce 1963 [80]. V roce 2011 vysokoteplotní generátor v osobním automobilu dosahoval výkonu více než 600 W [81]. Jedna z posledních publikovaných prací [82] uvádí, že na testovací lavici bylo dosaženo výkonu 712 W. Cílem první generace vyvíjených automobilových generátorů mělo být zmenšení a/nebo zkrácení doby provozu alternátoru a úspora minimálně 5 % paliva. Fairbanks [83] zmiňuje, že další generace generátorů by měla alternátor zcela nahradit. Podle Hendrickse a Lustbadera [84], [85] by z odpadního tepla v osobních automobilech bylo možné získat výkony přibližně 0,9 kW a v nákladních automobilech 5-6 kW. Crane a spol. [82] uvádí, že používané vysokoteplotní termoelektrické materiály poskytují již dostatečnou účinnost, aby automobilový generátor mohl komerčně vstoupit na trh.

1.3.3. Termoelektrické generátory ve spojení s domovními spalovacími zařízeními

V předchozích letech vzniklo množství experimentálních termoelektrických generátorů využívajících tepla z malých domovních spalovacích zařízení. Rešerše těchto generátorů a přehled jejich výkonových parametrů je proveden například v [86]. Mezi nejvýznamnější termoelektrické generátory v této kategorii se řadí termoelektrický systém vzniklý v roce 2009 spojením generátoru s plynovým hořákem na zemní plyn, který dosahoval elektrického výkonu 1 kW [87]. V oblasti malých kotlů na tuhá paliva je jedním z nejvýkonnějších generátorů postavených do současnosti termoelektrický generátor vzniklý spojením s komerčním 10 kW kotlem na dřevní pelety. Špičkový elektrický výkon dosahoval 350 W, po odečtení vlastní spotřeby kotle byl generátor schopen produkovat průměrně 276 W [88]. Tento generátor je na následujícím obrázku.



Obr. 1.17 Automatický teplovodní kotel na dřevní pelety s termoelektrickým generátorem [88]

1.3.4. Optimalizace generátorů

Termoelektrické moduly jsou v generátorech v tepelném kontaktu s tepelnými výměníky zajišťujícími přívod a odvod tepla. Teplo přiváděné na teplou stranu musí být ze studené strany permanentně odváděno. Zdrojem tepla pro přeměnu může být pevná látka, kapalina nebo plyn a dominantní složkou přenosu tepla kondukce, konvekce nebo radiace. Bude tomu odpovídat i provedení výměníků, které má vliv na výsledné výkonové parametry termoelektrického systému.

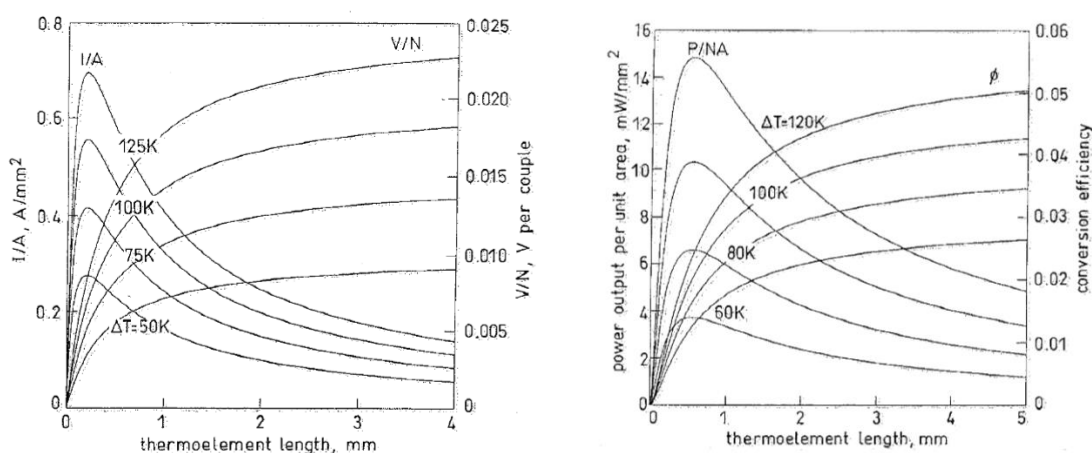
Předpoklad nekonečně velké tepelné vodivosti výměníků

Ze standardního CPM modelu termoelektrického modulu a rovnice (1.33) vyplývá, že výsledný elektrický výkon termoelektrických modulů je závislý na dosaženém teplotním rozdílu, na materiálových parametrech použitých polovodičů (ZT, power faktoru, α , ρ a λ , které jsou obecně funkcí teplot), na geometrii polovodičů (délce sloupků, průřezu sloupků, faktoru plnění termoelektrického modulu jako celku) a na velikosti zátěžného odporu (proudové hustotě). Vhodnou volbou těchto parametrů je možné moduly optimalizovat pro dosažení optimálního výkonu, účinnosti, váhy nebo např. ceny v konkrétní aplikaci [1; 6]. Úpravou rovnice (1.35), je možné vyjádřit výkon jedné polovodičové dvojice podle modelu CPM jako [89]:

$$P_{el,max} = \left(\frac{\alpha_{pn}^2}{\rho} \right) \left(\frac{\Delta T}{2} \right)^2 \left(\frac{A}{L} \right). \quad (1.35)$$

Z této rovnice vyplývá, že se zmenšující se délkou sloupků poroste výkon nereálně k nekonečnu [25]. Standardní model zanedbává kontaktní jevy (elektrické a tepelné odpory kontaktních vrstev), a tím i vliv těchto odporů, které jsou výrazné při velmi malých rozměrech sloupků. Není tak vhodným modelem pro popis termoelektrických modulů s krátkými sloupky. Navíc z CPM modelu vyplývá, že při použití optimální zátěže je účinnost termoelektrické přeměny polovodičové dvojice daná pouze teplotami

(Carnotova účinnost, fyzikální limit) a vlastnostmi materiálu (redukovaná účinnost) a není závislá na geometriích polovodičů. Sám autor tohoto modelu – Ioffe [7] zmiňuje, že pro dosažení co nejvyšší účinnosti při daných materiálových parametrech a poměru zátěžného odporu je potřeba najít optimální poměr průřezu a délky sloupku. Výsledkem jeho odvození je ale vzorec, ve kterém rozměry polovodičů nevystupují. Pokud se budou brát v potaz tepelné a elektrické kontaktní odpory, bude se uvažovat tzv. kontaktní model polovodičové dvojice, průběh elektrického výkonu bude jiný. Z grafů na Obr. 1.18, získaných z kontaktního modelu, vyplývá, že při určité malé, optimální délce sloupků dosahuje výkon maxima, a se zvyšující se délkou sloupků výkon postupně klesá, zatímco účinnost přeměny roste. Kontaktní model je tak lepší aproximací skutečného fyzikálního průběhu.



Obr. 1.18 Průběh elektrického proudu a výkonu polovodičové dvojice v závislosti na délce sloupku (vlevo) a průběh účinnosti polovodičové dvojice v závislosti na délce sloupku (vpravo) [25]

Jak standardní CPM model, tak kontaktní model nebo jiné 1D analytické modely spadající do kategorie takzvaných CTO (Constant Temperature Operation [6]) modelů neuvažují bez spojení s výpočtem přívodu a odvodu změnu okrajových teplot v závislosti na tepelném toku skrz polovodičové dvojice.

Modely pracují s konstantními teplotami, protože při odvozování modelu byly uvažovány Dirichletovy okrajové podmínky 1.druhu, předpokládaly se fixní teploty. Výpočet a optimalizace termoelektrického modulu podle modelu jsou prováděny tak, že pro zvolené teploty T_h a T_c na stranách modulu a pro dané materiálové a geometrické parametry modulu je dopočítán výkon modulu. Takto zvolenému a navrženému modulu odpovídá tepelný tok, který musí modulem procházet a výměníky ho musí být schopné zajistit, aby bylo dosaženo spočítaného elektrického výkonu. Modely tak uvažují zjednodušeně nekonečné vodivosti výměníků. Takový přístup by bylo možné uvažovat, pokud by se ze zdroje tepla odebíralo velmi malé množství tepelné energie a odběr by neovlivnil rozložení teplot. Takový předpoklad je vhodný např. pro energy-harvesting termoelektrická zařízení. Jejich elektrické výkony se pohybují v řádu miliwattů nebo menších. Tepelný odpor termoelektrických energy-harvesting termoelektrických modulů vyráběných planární technologií je natolik velký, že výrazněji neovlivní rozložení teplot na přívodu a odvodu tepla. Předpoklad konstantních teplot pro něho může být vhodný. V aplikacích využívajících odpadního tepla, které jsou i cílem práce, je potřeba uvažovat konečnou vodivost výměníků. Výpočet termoelektrického modulu musí být propojený s výpočtem výměníků a celkovým prostupem tepla. Aby byly tepelné toky mezi výměníky a moduly sladěné, zavádí se takzvané tepelné přizpůsobování (interfacial heat flux matching) [13; 90], s jehož pomocí se provádí i optimalizace geometrických parametrů polovodičů pro dosažení konkrétních výkonových stavů.

V aplikacích, které budou využívat volně dostupné odpadní teplo, Min a Rowe [25] uvádí zejména nízkoteplotní odpadní teplo, je v literatuře uváděna optimalizace pro dosažení maximálního výkonu.

Pro aplikace, ve kterých je tepelná energie pro termoelektrickou přeměnu zajišťována cíleným spalováním drahých fosilních paliv, je uváděna optimalizace pro dosažení maximální účinnosti. Tyto dva typy optimalizačních úloh jsou v literatuře zmiňovány nejčastěji. Nemusí být ale zcela žádoucí. Yee [91] s přístupem Mina a Rowa [25] optimalizovat moduly čistě na výkon nesouhlasí a poukazuje na ekonomická hlediska. Optimalizace, které provádí Hendricks [90; 92; 93], jsou pak spíše kompromisem výkonu a účinnosti.

Předpoklad konečné tepelné vodivosti výměníků

Protože účinnost termoelektrické přeměny roste lineárně s dosaženým rozdílem ΔT a výkon s druhou mocninou ΔT , historicky bylo jedním z konstrukčních přístupů zajistit tepelný odpor modulu co největší a tepelné odpory na přívodu a odvodu tepla co nejmenší. Clingman [94] v publikaci z roku 1961 uvádí, že při optimalizaci účinnosti generátoru by měly být polovodičové sloupky volené dostatečně dlouhé tak, aby tepelné odpory na přívodu a odvodu tepla byly zanedbatelné ve srovnání s tepelným odporem sloupek. Pokud bude tepelný odpor modulu maximalizovaný, například právě dlouhými sloupky, ΔT na modulu se bude blížit maximálnímu rozdílu teplot (bude se blížit teplotám v proudů médií), dosáhne se větší účinnosti, celkový tepelný tok konstrukcí ale bude minimální a výkon modulu také minimální. Výkon roste jenom do určité malé optimální délky sloupku, podobně jak je vyobrazeno na Obr. 1.18 z kontaktního modelu z roku 1996 [16; 25; 95]. Pokud délka sloupek naroste nad optimální hodnotu, tepelný odpor sloupek naroste a tepelný tok konstrukcí se zmenší. V důsledku toho sice naroste výsledná účinnost systému, ale elektrický výkon naopak poklesne. Může se i výrazněji projevovat rezistivita polovodičového materiálu a ztráty Jouleovým teplem, které narozdíl od Peltierova tepla rostou s druhou mocninou elektrického proudu. Při hodně dlouhých sloupcích pak bude i účinnost minimální. Pokud bude délka sloupek naopak klesat pod optimální hodnotu, tepelný odpor sloupek se bude snižovat, tepelný tok konstrukcí se bude zvětšovat a výsledné ΔT na modulu bude klesat. Poroste výkon termoelektrického modulu, ale bude klesat účinnost přeměny. S dalším snižováním délky sloupku začne klesat i výkon, který je závislý na druhé mocnině ΔT . Pokud se budou sloupky dále zmenšovat až dosáhnou délek < 1 mm, i teplotní difference bude velmi malá a pak i výkon minimální. Bude se výrazněji projevovat rezistivita kontaktních odporů, kterou nebude možné dále zanedbávat [1; 16; 25; 91; 96]. Při prostupu tepla konstrukcí tak není snahou mít na hranách modulu, respektive na hranách polovodičových sloupek co největší ΔT , ale mít optimální ΔT . Teplotním přizpůsobováním a vlivem velikostního ΔT na celkovou výkonost termoelektrických generátorů pro jednotlivé typy optimalizací se zabýval např. Hendricks a Lustbader, [84; 85], Yazawa a Shakouri [97], Apertet a spol. [95], Yee a spol. [91] a další autoři.

Optimalizace polovodičových sloupek pomocí tepelného přizpůsobování musí probíhat za současného elektrického přizpůsobování. Tepelná vodivost polovodičových sloupek se odvíjí od velikosti procházejícího proudu, respektive hustoty elektrického proudu. Je závislá na externí zátěži. Při svorkovém napětí, kdy modul není připojený k elektrické zátěži a neprochází ním elektrický proud, je tepelná vodivost polovodičových sloupek daná mřížkovou tepelnou vodivostí polovodičů. Při zkratovém proudu, kdy se napětí modulu blíží nulové hodnotě, je tepelná vodivost větší, protože se na vedení tepla podílí vedle mřížkové tepelné vodivosti i elektronová vodivost polovodičového materiálu. Vliv elektronové tepelné vodivosti na výslednou tepelnou vodivost termoelektrických modulů je v [98] připodobňován jako konvektivní tepelný tok související s pohybem elektronů. Vztah mezi tepelnými vodivostmi při svorkovém napětí a zkratovém proudu je pak vyjádřený následovně [6]:

$$K_{V=0} = K_{I=0}(1 + ZT_m). \quad (1.36)$$

Ani jeden z těchto stavů není z hlediska provozu žádoucí. Při optimálních provozních podmínkách se bude termoelektrický modul pohybovat mezi těmito dvěma limitními stavy.

Předpoklad konečné vodivosti výměníků – ideální tepelné kontakty

Yazawa a Shakouri [97; 19] se zabývali odvozením optimálních parametrů polovodičových sloupků při optimalizaci pro dosažení maximálního výkonu. Uvádí, že maximálního výkonu u termoelektrických materiálů se $ZT < 1$ je dosaženo volbou optimálního teplotního rozdílu dosahujícího přibližně 50 % celkového teplotního rozdílu. Odvození provedli při zanedbávání kontaktních jevů. Popis polovodičových sloupků provedli pomocí rovnic standardního CPM modelu a předpokladu konstantních materiálových parametrů. Uvažují tepelné odpory výměníků na teplé i studené straně stejné, v poměru 1:1 a tepelný odpor modulu při optimálním proudu stejný jako tepelný odpor kontaktů. Pro odvození optimálních parametrů sloupků využili metody Lagrangeových multiplikátorů.

Předpoklad konečné vodivosti výměníků – reálné tepelné kontakty

Optimalizaci při uvažování kontaktních odporů prováděli Hendricks a Lustbader [84; 85]. Do výpočtu prostupu tepla zahrnují efektivitu výměníků a optimální délku sloupku hledají pomocí parametrické analýzy. Tento přístup oproti přístupu Yazawi a Shakouriho nepodává vzorec pro konkrétní optimální délku sloupků. Hendricks [90] odmítá závěry Yazawy a Shakouriho [99]. Uvádí, že maximální výkon systému je při jednotkovém poměru tepelných odporů výměníků pouze teoretický. Pro dosažení optimálního výkonu by poměr tepelných odporů na teplé a studené straně měl být v rozmezí 10 až 30.

1.4. Domovní spalovací zařízení na tuhá paliva

Domovní spalovací zařízení, tzv. lokální topeniště jsou zdrojem značného množství znečišťujících látek. Redukce jejich emisí je v zemích Evropské unie spojena s plněním požadavků na snižování množství emisí a dosažení vyšších účinností spalovacích zařízení souvisejících s realizací Strategie Evropa 2020. Jedním z hlavních cílů je snížení produkce skleníkových plynů o 20 % oproti úrovní roku 1990, zvýšení podílu energie z obnovitelných zdrojů v konečné spotřebě energie na 20 % a posun ke zvýšení energetické účinnosti o 20 % [100]. V souvislosti s touto strategií i dalšími plány, legislativou a zavedenými směrnici došlo v oblasti domovních kotlů k zavedení takzvaných emisních tříd a selekci kotlů, viz norma ČSN EN 303-5 „Kotle pro ústřední vytápění“ nebo nověji Zákon č. 201/2012 Sb. o ochraně ovzduší, které stanovují požadavky na vyhovující kotle. Vlivem nastavených omezení zavedli výrobci kotlů na tuhá paliva technická opatření, která měla dopad na konstrukci spalovacích zařízení nově uváděných na trh. V návaznosti na to jsou v České republice realizovány i dotační programy⁵, které mají vyvažovat legislativní snahu o zamezení provozu starších nevyhovujících kotlů na tuhá paliva s ručním přikládáním a dochází tak k postupné obměně starších typů prohořivacích a odhořivacích kotlů

⁵ Takzvané kotlíkové dotace, dotační program vyhlášený Ministerstvem životního prostředí České republiky v rámci Operačního programu Životní prostředí pro roky 2014 až 2020, respektive 2022 [174], jehož cílem je výměna minimálně 80 tisíc kotlů z přibližně více jak 300 tisíc [175] v budoucnu legislativně nevyhovujících kotlů na tuhá paliva s ručním přikládáním, používaných pro ústřední vytápění. První výzva dotací z roku 2015 byla zaměřena na výměnu nevyhovujících kotlů za ekologické kotle nebo tepelná čerpadla. Druhá výzva z roku 2017 byla zaměřena na výměnu nevyhovujících kotlů za plynové kondenzační kotle, tepelná čerpadla, kotle na biomasu nebo automatické kombinované kotle. Třetí výzva z roku 2019 je zaměřena na výměnu nevyhovujících kotlů za tepelná čerpadla, kotle na biomasu se samočinnou nebo ruční dodávkou paliva nebo plynové kondenzační kotle.

a přechodu ke zplyňovacím a automatickým typům kotlů s různým stupněm automatizace, které jsou schopné splňovat příslušné legislativní požadavky.

1.4.1. Spotřeba elektrické energie

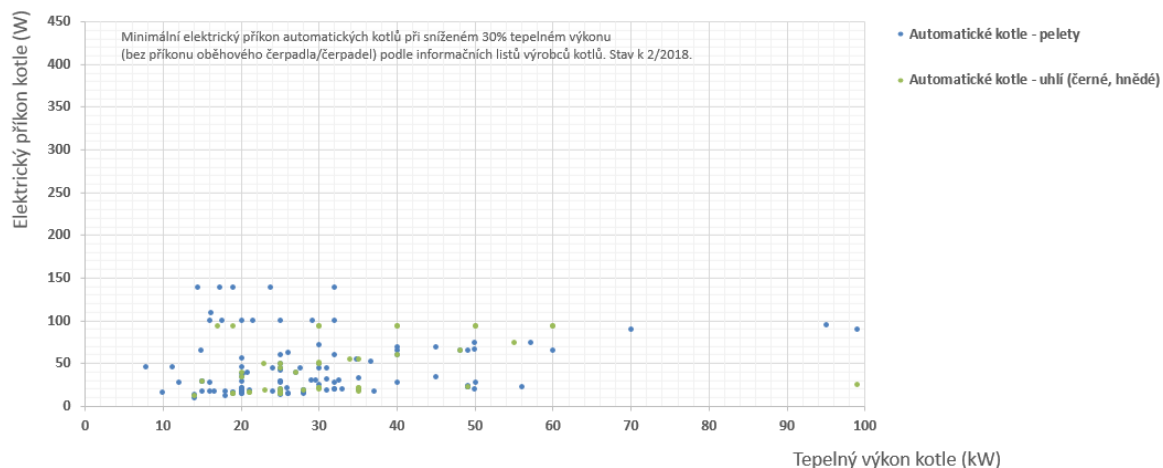
Pro potřeby dizertační práce bylo provedeno srovnání elektrických příkonů komerčně dostupných kotlů na tuhá paliva o tepelných výkonech do 70 kW. Cílem rešerše bylo zjistit především hodnoty průměrného elektrického příkonu kotlů při jmenovitých tepelných parametrech. Srovnání bylo provedeno pro dva hlavní konstrukční typy kotlů - automatické kotle a zplyňovací kotle. Konkrétněji automatické kotle spalující dřevní pelety a/nebo uhlí a zplyňovací kotle spalující kusové dřevo nebo uhlí. Tabulka s údaji kotlů je uvedena v příloze P2.

Na území České republiky je od roku 2018 možné prodávat kotle splňující minimálně 4. emisní třídu (Nařízení EU č. 1189/2015 pro provádění směrnice 2009/125/ES a č. 1187/2015 pro doplnění směrnice 2010/30/EU). Do srovnání jsou proto zahrnuty kotle spadající podle ČSN EN 303-5 do 4. a 5. emisní třídy. Pro případné srovnání byly do výčtu zahrnuty v omezené míře i kotle spadající do 3. emisní třídy a v několika případech i krbová kamna s teplovodním výměníkem. Do přehledu byly zahrnuti vedle výrobců kotlů z ČR výrobci z Chorvatska, Itálie, Německa, Polska, Rakouska, Slovenska a Španělska. Data pro grafy byla přejata z oficiálních katalogových listů výrobců. Podle Nařízení komise (EU) 2015/1189 (požadavky na ekodesign kotlů na tuhá paliva) musí dodavatelé uvádějící kotle na tuhá paliva na trh od 1. dubna 2017 udávat konkrétní technické informace (viz jednotlivé body směrnice), včetně hodnot elektrických příkonů kotlů při minimálním tepelném výkonu a jmenovitém tepelném výkonu kotle. Tyto údaje by byly pro rešerši hodnotné, ve všech případech se je ale z dostupných informačních materiálů, katalogových listů nebo prezentačních materiálů poskytovaných výrobcí kotlů vyčíst nepodařilo. Srovnání je provedené u konkrétních kotlů, jejichž výrobci k únoru roku 2018 poskytovali relevantní technické údaje, konkrétně se jednalo o výrobce: Agromechanika [101], Atmos [102], Attack [103], Benekov [104], Centrometal Tehnika Grijanja [105], Dakon [106], Defro [107], Easypell (Eco Engineering) [108], EdilKamin [109], Envo [110], Ekogalva [111], Elektromet [112], Eta Heiztechnik [113], Fröling [114], Galmet [115], Esel (Guntamatic Heiztechnik) [116], Hargassner [117], Kalor [118], Kolton [119], Kovarson [120], Opop [121], Petrojet [122], Ponast [123], Rojek [124], SAS [125], Slokov [126], Topmax [127], Verner [128], Viadrus [129; 130], Viessmann [131], Windhager [132] a ZK Design [133]. Sledovanými parametry kotlů byly:

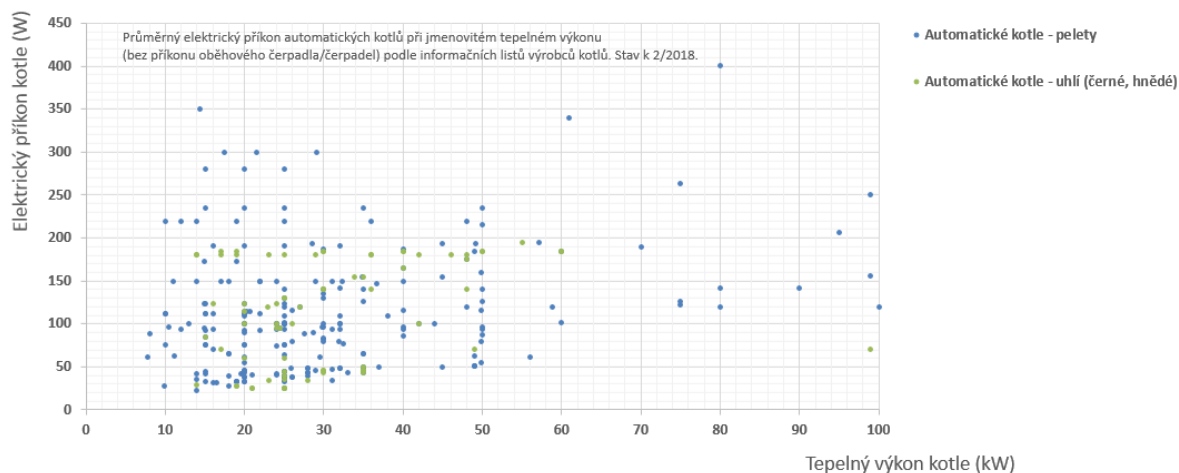
- elektrický příkon při minimálním (30%) tepelném výkonu;
- elektrický příkon při jmenovitém (100%) tepelném výkonu;
- maximální elektrický příkon (v případě automatických kotlů se jedná obvykle o příkon při zapalování).

Výsledky jsou shrnuty v grafech na následujících stranách. Vzhledem k charakteru dat, možným způsobům měření elektrických příkonů výrobcí, absenci bližších informací nebo nedostatečnému množství dat je vypovídající hodnota grafů limitovaná. V grafech proto nebyly například zaváděny střední hodnoty nebo medián příkonu.

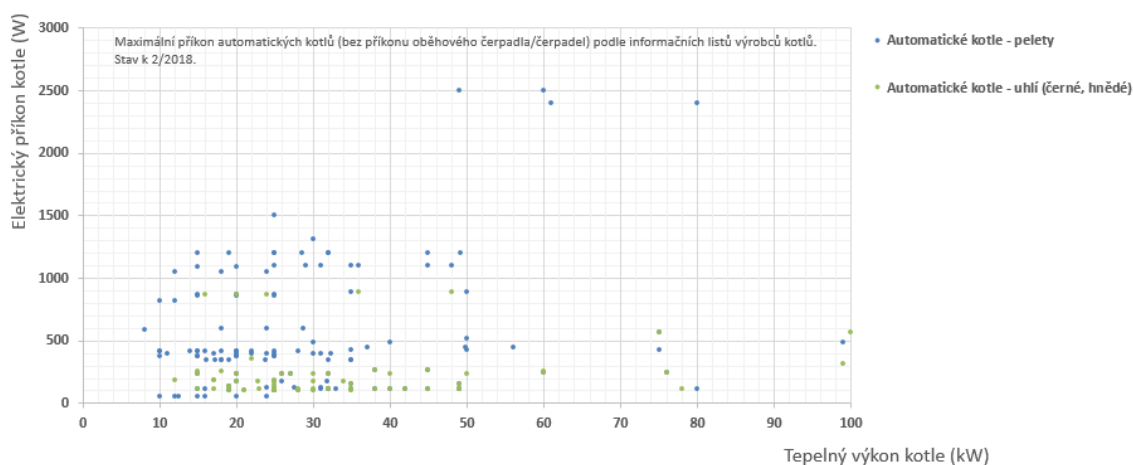
Přehled elektrických příkonů automatických kotlů na tuhá paliva:



Obr. 1.19 Elektrický příkon automatických kotlů při minimálním 30% tepelném výkonu kotle

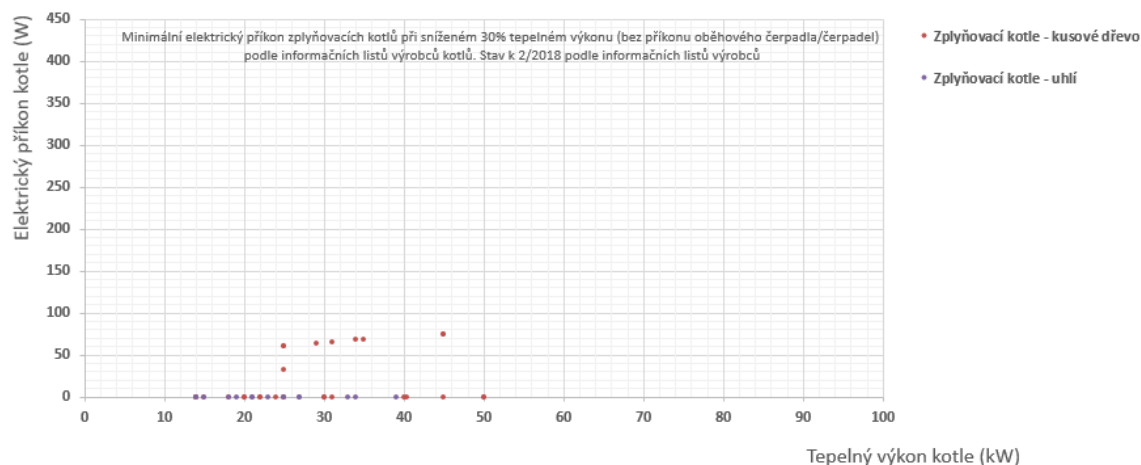


Obr. 1.20 Elektrický příkon automatických kotlů při jmenovitém 100% tepelném výkonu kotle

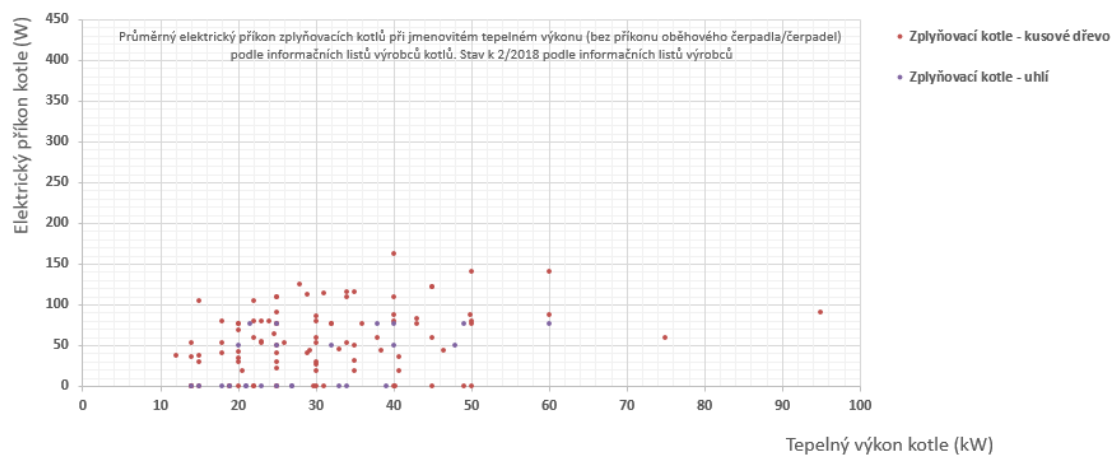


Obr. 1.21 Maximální elektrický příkon automatických kotlů

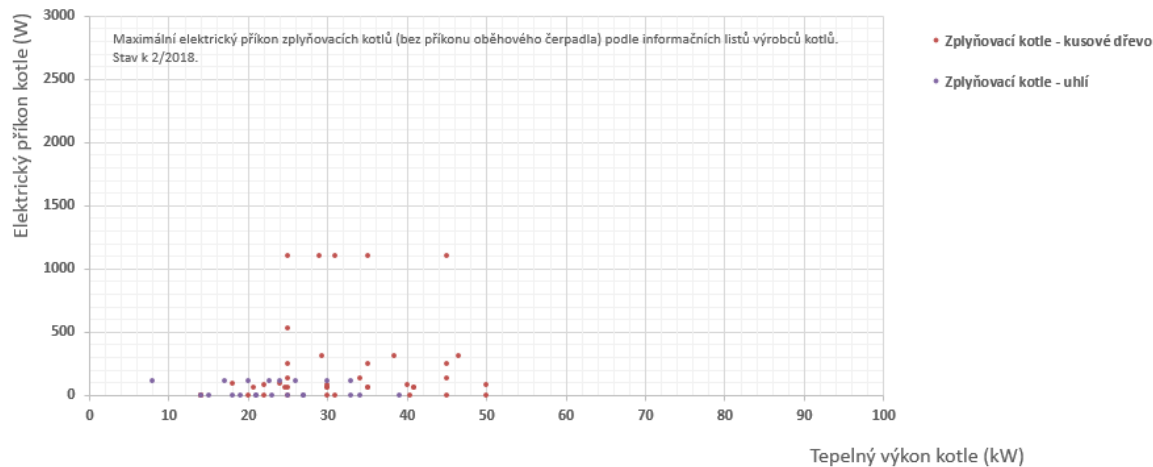
Přehled elektrických příkonů zplyňovacích kotlů na tuhá paliva:



Obr. 1.22 Elektrický příkon zplyňovacích kotlů při minimálním 30% tepelném výkonu kotle



Obr. 1.23 Elektrický příkon zplyňovacích kotlů při jmenovitém 100% tepelném výkonu kotle



Obr. 1.24 Maximální elektrický příkon zplyňovacích kotlů

Výrobci nejčastěji uváděli hodnoty elektrického příkonu při jmenovitém tepelném výkonu. Uváděné hodnoty byly až na výjimky příkony vlastních spalovacích zařízení, bez oběhových čerpadel nebo externího příslušenství. U automatických kotlů na pelety je v daném rozsahu tepelných výkonů kotlů rozpětí elektrických příkonů při jmenovitém tepelném výkonu značné. Pohybuje se v rozmezí od 25 W do 350 W. V případě automatických kotlů na uhlí jsou příkony při jmenovitém tepelném výkonu kotlů přibližně poloviční, od 30 W do 200 W. Příkony zplyňovacích kotlů, na dřevo i uhlí jsou oproti automatickým kotlům výrazně nižší. V několika případech jsou příkony zplyňovacích kotlů zcela nulové a napájení vyžadují pouze externí zařízení, která nebývají součástí dodávky vlastního spalovacího zařízení. Zástupci takovýchto kotlů jsou uvedeni v Tab. 1.1.

Tab. 1.1 Parametry vybraných kotlů nevyžadující samostatně připojení k rozvodné síti [126; 134-137]

Výrobce	Typ kotle	Jmenovitý tepelný výkon kotle (kW)	Typ paliva	Účinnost při odpovídajícím tepelném výkonu (%)	Odpovídající spotřeba paliva (kg/h)	Teplota spalin (°C) ⁶	Hmotnostní tok spalin (kg/s)	Požadovaný tah komína (Pa)
Viadrus	Hercules U32 D (5 čl.)	15	Palivové dřevo	88,9	3,7	150	0,0100	18
	Hercules U32 B (5 čl.)		Hnědé uhlí	89,9	2,3	150	0,0080	18
	Hercules U32 (5 čl.)		Černé uhlí	89,6	2,1	150	0,0080	18
	Hercules U32 D (6 čl.)	19	Palivové dřevo	88,3	4,8	150	0,0137	20
	Hercules U32 B (6 čl.)		Hnědé uhlí	86,5	3,2	150	0,0112	23
	Hercules U32 (6 čl.)		Černé uhlí	88,6	3,1	150	0,0127	23
	Hercules U32 D (7 čl.)	22	Palivové dřevo	88	5,5	150	0,0150	22
	Hercules U32 B (7 čl.)		Hnědé uhlí	90,1	3,5	150	0,0123	25
	Hercules U32 (7 čl.)		Černé uhlí	89,4	3,5	150	0,0133	25
Viadrus	U22 Economy	16	Palivové dřevo	89,1	3,9	165	0,0120	13
		21	Palivové dřevo	89	5,1	165	0,0140	16
		25	Palivové dřevo	89	5,9	165	0,0150	18
		30	Palivové dřevo	88,7	7,2	165	0,0160	21
Slovak	SL27-4	27	Hnědé uhlí	84	6,2	190	0,019	21
ABX	064	13	Dřevo	80,2	3,3	264	0,009	12
BEF	WH V 105 AQUATIC	20,5	Dřevo	82,3	5,8	262	0,016	12

Příkony, zejména automatických kotlů jsou citelné. Evropská komise ve svém nařízení 2015/1189 [138] uvádí, že se očekává, že v roce 2030 by roční spotřeba elektrické energie v souvislosti s kotli na tuhá paliva mohla dosahovat 530 petajoulů (přibližně 12,7 milionu tun ropného ekvivalentu), roční emise

⁶ Pozn.: Pokud výrobce uvádí teplotu spalin na výstupu jako rozsah teplot, je uváděna střední hodnota.

částic mohly dosahovat 25 kilotun, 25 kilotun organických plynných sloučenin a 292 kt oxidu uhlenatého. Současně je Evropskou komisí také uváděno, že existují i dostupná, nechráněná řešení, která by mohla napomoci snížení příkonu a měla by být patrně adoptována. Příkony kotlů na tuhá paliva u automatických typů by oproti současnému stavu mohly do budoucna růst vlivem zdokonalování uživatelských parametrů prodáváných kotlů, například vlivem širšího využívání funkcí jako je automatické odpopelňování, sání dřevních pelet ze zásobníků v případě kotlů na pelety, apod. V menší míře i rozšířenou konektivitou spalovacích zařízení skrz wifi nebo ethernet a možnostmi koncového uživatele sledovat a ovlivňovat parametry kotlů a chování teplovodní soustavy (v současnosti dostupné především u kotlů zahraničních výrobců).

1.4.2. Oběhová čerpadla a ekodesign energetických spotřebičů

V průběhu předchozích let došlo vlivem směrnice Evropského parlamentu a Rady 2009/125/ES o stanovení rámce pro určení požadavků na ekodesign výrobků spojených se spotřebou energie od roku 2013 k zavedených přísnějších energetických požadavků na nově vyráběná oběhová čerpadla a v souvislosti s tím se na trhu objevila i účinnější nízkopříkonová oběhová čerpadla, s příkony v řádu jednotek wattů. Byla provedena rešerše v současnosti dostupných oběhových čerpadel a porovnány jejich parametry. Soupis nalezených nízkopříkonových oběhových čerpadel a jejich parametrů je uvedený v příloze P3. Vzhledem k značnému množství tepla ve spalínách kotlů a existenci účinnějších oběhových čerpadel vyvstala otázka, zda by bylo možné napájet termoelektřinou, chladit tím kotle a přispět ke zvýšení bezpečnosti a stability provozu v případně náhlých výpadků elektrického napájení. Pokud by takové spojení bylo funkční, mohlo by dojít i k lepšímu využití energie paliva. Takovýto systém není v současnosti řešený a v této oblasti se žádná z dosud publikovaných prací nezabývala termoelektrickým generátorem malého výkonu, který by byl určený pouze pro napájení oběhových čerpadel kotlů, jejich chlazení a tím i zajištění provozu.

2. Shrnutí provedené rešerše a její analýza

2.1. Termoelektrická přeměna a termoelektrické materiály

Z dostupných informačních zdrojů vyplývá, že myšlenka využití termoelektrické přeměny a termoelektrických jevů jako zdrojů elektrické energie není nová. Historicky bylo a je termoelektrických generátorů čteně využíváno [139]. V minulosti vznikla celá řada termoelektrických aplikací. V současnosti existuje řada komerčně dostupných termoelektrických generátorů využívajících fosilních paliv schopných dlouhodobě spolehlivého provozu. Vzhledem k nízké účinnosti termoelektrické přeměny jsou ale nově vyvíjené aplikace orientovány především na využití odpadního tepla. V tomto směru je patrný dlouhodobý trend. Snahou je stavět autonomní systémy nezávislé na dodávkách elektřiny z rozvodné sítě nebo chemických zdrojů elektrické energie. Z jednotlivých vývojových směrů je nejpokročilejší vývoj automobilových termoelektrických generátorů, který byl a i v současnosti je [140], masivně finančně podporován. Výsledky z tohoto výzkumu se promítají i do vývoje ostatních termoelektrických aplikací a pozitivně stimulují celkový vývoj. Vedle snah v automobilovém průmyslu (USA, Německo, Japonsko, Korea), je v aplikovaném výzkumu dále patrná snaha přeměny odpadního tepla vznikajícího ve spalovnách komunálního odpadu a železárnách (USA, Německo, Japonsko). V oblasti nejmenších výkonů je snahou napájení senzorové techniky z odpadního tepla, tzv. energy harvesting termoelektrické aplikace (celosvětově). Méně častěji, i přes velké množství vyprodukovaného odpadního tepla, jsou předmětem zájmu malá stacionární spalovací zařízení o výkonech jednotek až desítek kW (USA, Kanada, obecně severské rozvinuté oblasti Ameriky a Evropy). Tato vývojová linie představující snahy o zajištění autonomního provozu tepelných zařízení se váže i k předmětu této dizertační práce. V zemích třetího světa je snahou pomocí termoelektřiny, resp. malých termoelektrických generátorů zajistit řízený spalovací proces, který by snížil množství exhalací z primitivních kotlů a kotlíků a snížil jejich negativní vliv na lokální i globální úrovni. Mimo tyto vyjmenované existuje i mnoho jiných termoelektrických aplikací.

Snaha využívat odpadní nebo nízkopotenciální teplo v souvislosti s termoelektřinou je zřejmá, stejně tak ale i nízká účinnost a výkon termoelektrických generátorů, které jsou omezené fyzikálními limity. Pokud budeme chtít se současnými termoelektrickými materiály dosáhnout vyšších účinností a výkonů, musí být generátory provozované za vyšších teplot, které sice umožňují dosáhnout dílčího výkonového zvýšení, v této oblasti se ale objevují konstrukční obtíže (konstrukce generátorů obsahující segmentované termoelektrické materiály a moduly, kaskádované termoelektrické moduly [16]), následované životností (difuze, pnutí, oxidace, sublimace materiálů, případně i potřeba vakua), dostupností termoelektrických materiálů (využívají se ve větší míře vzácné nebo špatně dostupné prvky, případně toxické prvky a/nebo kombinace tohoto všeho) a následně cenou za watt takového řešení. Takováto řešení se následně vzdalují původní myšlence jednoduchého využití především nízkopotenciálního odpadního tepla. V současnosti neexistuje univerzální, levný a netoxický termoelektrický materiál umožňující termoelektrickou přeměnu v širokém rozmezí teplot s výbornou

účinností. Přestože existuje široké spektrum termoelektrických materiálů, v současnosti nepoužívanějšími materiály pro přeměnu nízkopotenciálního tepla jsou původní polovodičové materiály z Bi_2Te_3 , objevené na přelomu padesátých a šedesátých let. V této oblasti neexistuje mnoho alternativ. Ostatní známé termoelektrické materiály nedosahují při nízkých teplotách srovnatelných účinností a materiály, z nichž mnohé jsou v publikacích často označovány jako „materiály používané v průmyslu“, nejsou až na výjimky snadno komerčně dostupné. Tyto materiály nacházejí uplatnění např. ve vesmírných sondách a v experimentálních automobilových generátorech. Jsou ale vyráběny především na specializovaných akademických pracovištích. Slitiny teluru a bismutu, vzhledem k jejich horší dostupnosti (tyto prvky nalézají využití především v jiných průmyslových odvětvích), nejsou vhodné pro hromadnou přeměnu odpadního tepla. Podobně jako slitiny s olovem, které je toxické. Pro napájení běžných spotřebičů existují účelnější zdroje než termoelektrické generátory a termoelektrina využívající nízkopotenciálního tepla. Podle vedoucích autorů v tomto oboru jsou v této oblasti (pokud jsou využívány tyto prvky) proto žádoucí takové termoelektrické aplikace, které poskytují vyšší přidanou hodnotu. Dokud nebude možné vyrábět levně termoelektrické materiály s výrazně lepšími vlastnostmi, není masová přeměna odpadního tepla s využitím termoelektriny reálná.

V návaznosti na současný stav se odborné práce v oblasti termoelektrické přeměny primárně soustředí na materiálový výzkum, nalezení vhodnějších termoelektrických materiálů nebo zlepšení účinnosti přeměny stávajících termoelektrických materiálů (celosvětově, včetně České republiky), především pak anorganických termoelektrických materiálů. V menším měřítku probíhá i vývoj organických termoelektrických materiálů. Vedle materiálového výzkumu stojí aplikovaný výzkum a snaha o zefektivnění a zjednodušení výrobních postupů termoelektrických modulů a snížení jejich výrobních nákladů. A to zejména u vysokoteplotních typů termoelektrických modulů [140] a tenkovrstvých termoelektrických modulů. Objevují se i kroky a snahy vedoucí k 3D tisku termoelektrických polovodičových materiálů a modulů. Obecně se předpokládá, že v dlouhodobém horizontu by zlepšení účinnosti termoelektrické přeměny mohlo zajistit zvýšení účinnosti stávajících transformačních procesů, úsporu paliv a redukci emisí. K možnostem dosažení výrazně vyšších účinností v budoucnu, které by měly mít i výrazný hospodářský dopad, ale současně zaznívají kritické hlasy [141]. S ohledem na vývoj např. zmíněných automobilových termoelektrických aplikací nebo dalších aplikací, výzkum v této oblasti bude pokračovat.

2.2. Mikrokogenerace a domovní spalovací zařízení

Z hlediska potřeby hodnocení termoelektriny jako potenciálního elektrického zdroje ve vztahu k mikrokogeneraci a předkládanému tématu dizertační práce je z rešerše patrné, že ani komerční, ani velké experimentální termoelektrické generátory nedosahují běžně výkonů větších než 1 kW. Komerčně dostupné termoelektrické generátory pro aplikace v odlehlých nebo nepřístupných oblastech spalující klasická fosilní paliva dosahují běžně výkonů maximálně stovek wattů nebo menších a doposud publikované výzkumné práce zabývající se termoelektrickými generátory využívajícími odpadního tepla malých stacionárních spalovacích zařízení⁷ dosahují výkonů nejčastěji v rozmezí jednotek až stovek wattů. Cílem mnohých autorů je výhledově přeměnit co možná největší množství tepla a dosáhnout větších výkonů. Termoelektrina je takto často prezentována. Domnívám se, s ohledem na všechny uvedené předchozí závěry týkající se účinnosti současných termoelektrických materiálů, jejich dostupnosti, složitosti konstrukcí, ceny za watt a dalších, že není pro běžná spalovací zařízení

⁷ Jsou uvažována moderní spalovací zařízení s řízeným spalovacím procesem.

v současnosti opodstatněné konstruovat termoelektrické generátory o větších výkonech ($> 1 \text{ kW}$) a možnosti termoelektrických generátorů jako součástí typických kogeneračních jednotek jsou spíše omezené. Alespoň do doby, než budou k dispozici vhodnější termoelektrické materiály nebo se podaří snížit výrobní cenu termoelektrických modulů, pokud se tak stane, viz výše.

Pokud je zvažováno využití termoelektrické přeměny u spalovacích zařízení v kategorii domovního nebo komerčního vytápění, domnívám se, že v současnosti je účelnější získanou elektřinou zajišťovat autonomnost spalovacích zařízení a zvyšovat spolehlivost a bezpečnost jejich provozu, než se snažit napájet nesouvisející externí elektrická zařízení o větších příkonech. Viz elektrická spotřeba domovních spalovacích zařízení a velikosti příkonů moderních kotlů na tuhá paliva. V souvislosti s realizací Strategie Evropa 2020 dochází v České republice a státech Evropské unie k postupné obměně domovních kotlů na tuhá paliva. Od roku 2022 budou legislativní požadavky splňovat nízkoemisní zplyňovací a automatické kotle. Oproti dnes nevyhovujícím odhořívacím a prohořívacím kotlům zplyňovací a především automatické kotle vyžadují pro svůj provoz větší elektrické příkony. Vedlejším efektem snah o redukci exhalací domovních kotlů na tuhá paliva tak bude větší závislost na dodávkách elektřiny z rozvodné sítě. Termoelektrickou přeměnou je možné získat elektrické výkony, které by mohly v některých případech i kompletně pokrýt veškeré energetické požadavky kotlů a jejich příslušenství. Toto bylo demonstrováno už dříve [88]. Otázkou je ale vhodnost takového řešení a případná komerční úspěšnost. Přestože takovéto kotle experimentálně vznikly, obdobná zařízení nejsou dodnes komerčně dostupná.

Z rešerše vyplývá, že část komerčně dostupných nízkoemisních zplyňovacích kotlů na dřevo a uhlí má velmi malé nebo i nulové elektrické příkony. V některých případech tak mohou tyto kotle, pokud jsou tyto provozovány v otopných soustavách s přirozenou cirkulací (samotíž), pracovat zcela bez elektrického napájení. V soustavách s nucenou cirkulací chladicí vody samostatně pracovat nemohou a je potřeba napájet externí oběhová čerpadla, případně další příslušenství. Pokud by termoelektrický generátor poskytoval dostatečný výkon alespoň pro napájení čerpadel, provoz zplyňovacích kotlů na dřevo a uhlí, případně i krbů, křbových vložek nebo kamen s teplovodními výměníky, které samy o sobě nevyžadují napájení, by mohl být v soustavách s nucenou cirkulací zajištěn termoelektrickými generátory a tím nezávisle na dodávkách elektřiny. Takový systém by mohl nalézt uplatnění v místech bez přístupu k vedení nízkého napětí nebo v případech nenadálých výpadků elektřiny, například v důsledku nahodilých poruch nebo vlivem počasí. Cílem další části práce je tento předpoklad ověřit.

3. Vymezení cílů dizertační práce a způsob jejich řešení

V souladu s pojednáním k dizertační práci a závěry státní doktorské zkoušky jsou cíle předkládané dizertační práce definovány následovně:

- vytvořit simulační nástroj hodnotící uplatnění termoelektrických generátorů;
- ověřit experimentálně provozní parametry generátoru v reálné aplikaci;
- provést softwarové řízení generátoru pro maximalizaci produkce elektrické energie.

3.1. Vědecká otázka

Vzhledem k limitovanému potenciálu termoelektrické přeměny jako zdroje elektřiny pro velká mikrokogenerační zařízení bylo zvoleno, že podstatou dizertační práce bude ověření využitelnosti termoelektrické přeměny při výrobě elektřiny z odpadního tepla malých spalovacích zařízení na tuhá paliva – domovních kotlů pro ústřední vytápění. Prací by mělo být zodpovězeno, zda je možné při využití dostupných nízkoteplotních Bi_2Te_3 termoelektrických materiálů a termoelektrických modulů přeměňujících nízkopotenciální odpadní teplo spalín kotlů (na výstupu z kotlů) získat na omezené teplosměnné ploše dostatečné množství elektřiny pro napájení oběhových čerpadel, a tím zajistit chlazení kotlů. Také ukázat výhody nebo nevýhody termoelektrických generátorů pro záložní a nouzové napájecí systémy.

3.2. Předpoklady a pracovní hypotézy

Zdrojem tepla v uvažované aplikaci budou spaliny. Termoelektrický generátor bude umístěn na výstupním spalínovém hrdle kotle. Předpokládá se využití běžně komerčně dostupných nízkoteplotních Bi_2Te_3 termoelektrických materiálů. Praktické rozmezí jejich provozních teplot se nachází přibližně v rozmezí 90 °C až 200 °C [93]. Rozsah těchto teplot se blíží teplotám odchozích spalín nízkoemisních kotlů. Z pohledu instalace generátoru a provádění experimentů je umístění generátoru ve spalínové trase až za kotlem jednodušší, protože není potřeba zasahovat do konstrukce kotle a externí generátor by mělo být možné připojit i za jiná existující spalovací zařízení. Tepelná účinnost kotlů a účinnost termoelektrické přeměny jsou ale v určitém protikladu. Účinnost termoelektrické přeměny roste s provozní teplotou. S rostoucí účinností nových nízkoemisních kotlů na tuhá paliva budou ale spaliny na výstupech z kotlů více vychlazené a případná přeměna jejich zbytkového odpadního tepla méně efektivnější. Případná přeměna by mohla být realizována i středně- nebo vysokoteplotními termoelektrickými moduly, které by ale musely být zabudovány do vnitřních výhřevných ploch kotle. Tato možnost může být zvažována v závislosti na dosažených výsledcích.

Termoelektrické generátory jsou v principu rekuperační výměníky. Teplo odebrané spalínám bude v generátoru, vyjma tepla přeměněného na elektřinu a tepelné ztráty, předáváno chladicí vodě. Chlazení je uvažováno v tzv. parazitní konfiguraci [70] vratnou vodou vracející se z teplovodní soustavy do kotle. Přivedením tepla spalin se v generátoru, respektive termoelektrických modulech část tepla spalin vlivem Seebeckova a Peltierova jevu přemění na elektřinu. Vzhledem k účinnosti termoelektrické přeměny ale většina tepla procházejícího generátorem bez přeměny na elektřinu odejde do chladicí vody. Generátor bude v principu plnit funkci ekonomizéru a vedlejším efektem bude předeřev otopné vody, případně i dílčí zvýšení tepelné účinnosti soustavy kotle.

Předpokládám, že výkon generátoru bude odvislý od množství tepla, které bude možné spalínám v generátoru „ještě“ odebrat, aby v ústí komínu nedocházelo ke kondenzaci spalin. Připojení termoelektrického generátoru ke kotli nemusí být bezproblémové z provozního hlediska, z pohledu dlouhodobé funkčnosti a bezpečnosti spalovacího zařízení, protože spaliny se budou více ochlazovat než samostatným průchodem pouze kouřovodem a komínem. Pokud by byl komín uzpůsobený pro provoz s kondenzujícími parami, bylo by možné spaliny ochladit více. Využití mokrého komínu ale uvažováno není. Komíny u spotřebičů na tuhá paliva bývají navrhovány jako suché komíny [142]. Při spalování tuhých paliv v nekondenzačních kotlích je snahou se vyhnout kondenzaci některých složek spalin v odkouření kotle. Není žádoucí, aby teplota spalin při následném průchodu kouřovodem a komínem byla příliš nízká. Uvnitř odkouření by docházelo ke kondenzaci spalin a dehtování, v důsledku toho by mohlo být poškozeno komínové těleso, mohlo by dojít k vniknutí kondenzátu do kotle a narušení jeho provozu, případně by mohlo dojít i k poškození kotle. V krajním případě, pokud by byl komín dehty zanesen, by mohlo dojít i k požáru [143]. Poškození kotlů kyselým kondenzátem pak hrozí u kotlů na uhlí, kde po vzniku sekundárního SO_3 reagujícího s vodní parou vzniká H_2SO_4 , která kondenzuje už při 160°C a která spalinovou cestu i s výměníkem kotle značně poškozuje. Při instalacích nových nízkoemisních kotlů splňujících podmínky ekodesignu, pro které je i generátor uvažován, je potřeba řešit stav a vhodnost spalinové trasy. Jedná se o téma široce diskutované odbornou veřejností, viz např. Lyčka [144; 145] nebo Sodomka [143]. Nevhodně zvolený externí termoelektrický generátor by toto mohl dále zhoršovat. Kondenzace spalin u kotlů by měla být eliminována na případné najíždění a odstavování kotle. Uvažuji proto, že teplo bude možné spalínám odebírat, ale po průchodu spalin generátorem, kouřovodem a komínem nesmí v ústí komínu docházet k podkročení teploty rosného bodu spalin a jejich kondenzaci. A to včetně teplotní rezervy, protože stěna komína bude chladnější než teplota spalin proudící středem odtahu spalin. Množství tepla, které bude možné generátorem spalínám odebrat, by mělo být možné ovlivnit provedením odkouření, termoizolačními vlastnostmi kouřovodu a komína a účinnou výškou komína. Oba tyto parametry odkouření ale nesmí neúměrně narůstat.

Oproti dříve publikovaným experimentálním generátorům je cílem práce zajistit pouze limitovaný elektrický výkon generátoru. Předpokládám také, že zařízení by mělo být také kompaktní. Nepředpokládám napájení vzduchového nebo spalinového ventilátoru kotlů zajišťující nucený komínový tah, protože by došlo ke zvýšení požadovaných elektrických výkonů generátoru. Odkouření z kotlů by mělo být možné zajistit přirozeným tahem komína a generátor by měl být zkonstruovaný tak, aby přirozený komínový tah nenarušoval. Výrobci kotlů uvádí požadavky na tah komína přibližně v rozmezí 15 až 30 Pa. Generátor vřazený do spalinové trasy by tak neměl vytvářet výraznější tlakové ztráty. Jeho předběžně uvažovaná tlaková ztráta by tak měla být řádově v jednotkách Pa a provedení spalinového výměníku generátoru by touto tlakovou ztrátou mělo být řízené. Vzhledem k požadavkům příslušných norem (např. ČSN 73 4201) musí být součástí kouřovodu a komína, případě i generátoru, možné čistit. V souvislosti s dalšími požadavky na provedení odkouření vyplývá, že termoelektrický generátor by měl být provedený na straně spalin s určitým „hladkým“ designem, v odkouření by neměla být výrazná žebra spalinového výměníku generátoru. Spaliny mají obecně malou tepelnou kapacitu i tepelnou vodivost. Přestup tepla ze spalin, respektive určitá nemožnost intenzifikace přenosu tepla na straně spalin tak bude

patrně to, co bude nejvýrazněji ovlivňovat konstrukci generátoru a jeho výkonové parametry. Domnívám se, že pouhé zlepšení termoizolačních parametrů odkouření nemusí být dostačující. Vzhledem k podmínkám teplotního přizpůsobení, kdy tepelný odpor modulu a odpory výměníků musí být v určitém poměru pro dosažení optimálních výkonových parametrů termoelektrických modulů a současně výše zvoleným požadavkům na provedení spalinového výměníku generátoru, předpokládám, že při použití dostupných komerčních termoelektrických modulů bude výsledné ΔT modulech vycházet velmi malé, v důsledku toho i výkon a účinnost modulů a z toho následně vyplývající potřeba velkého množství termoelektrických modulů a následně nevyhovující cena. Prováděný výpočet by měl poskytnout základní informace o optimální geometrii polovodičových sloupků termoelektrických modulů, které by při zvolených parametrech výměníků umožňovaly dosáhnout maximálního výkonu generátoru.

Pozitivní vliv na konstrukci a výkon generátoru by mohlo mít spalování některých druhů paliv, například palivového dřeva. V případě spalování uhelných paliv se bude negativně projevovat vysoká teplota rosného bodu, která bude snižovat množství využitelného tepla pro generátor. Z pohledu případných simulací by proto bylo vhodné postihnout vliv paliva, respektive chemického složení paliv a do výpočtu jej zahrnout.

3.3. Způsob provedení dizertační práce

Hlavním smyslem předkládané práce je vývoj autonomního napájecího systému umožňujícího v budoucnu provoz oběhového čerpadla a chlazení malých teplovodních spalovacích zařízení spalujících tuhá paliva nezávisle na dodávkách elektřiny z rozvodné sítě. Pro návrh a následné sestavení termoelektrického systému vznikla potřeba matematického nástroje, který by dokázal predikovat výkon termoelektrického generátoru v závislosti na jeho provedení, v závislosti na tepelném příkonu ve spalínách, provedení odkouření za generátorem, případně na dalších konstrukčních nebo jiných parametrech. Tento simulační nástroj umožňující predikci maximálního výkonu termoelektrického generátoru bude reprezentovat teoretický výstup práce a první hlavní cíl.

Předpokládaný praktický výstup dizertační práce bude založený na experimentálním termoelektrickém generátoru. Po jeho zkompletování bude provedena série měření zatěžovacích charakteristik a vyhodnocen jeho dosahovaný elektrický výkon. Sestavení termoelektrického generátoru a odzkoušení na zvoleném teplovodním kotli bude reprezentovat druhý hlavní cíl práce. S pomocí tohoto generátoru bude provedeno srovnání reálně změřených výsledků s výsledky simulačního nástroje a provedena validace a verifikace simulačního nástroje. V návaznosti na to budou ověřeny hypotézy a zodpovězena položená otázka.

Třetím z uváděných cílů práce má být provedení softwarového řízení generátoru, konkrétněji softwarové řízení stejnosměrného DC/DC měniče s technologií MPPT (Maximum Power Point Tracking), hlídání bodu maximálního výkonu, které by mělo zajišťovat přenesení maximálního výkonu ze stejnosměrného generátoru do zátěže - stejnosměrného čerpadla. V rámci prvotní rešerše bylo vytipováno a později i pořízeno 12 V nízkopříkonové mokroběžné oběhové čerpadlo Jablotron CP-201. Napájení stejnosměrné varianty oběhového čerpadla se jevílo jako optimální. Na základě tohoto byl při obhajobě pojednání k dizertační práci tento bod zvolen jako jeden z hlavních cílů budoucí dizertační práce. Jak vyplývá z následně detailněji provedené rešerše oběhových čerpadel uvedené v příloze P3, zmíněné čerpadlo bylo jediné na trhu nalezené oběhové čerpadlo, které je napájené 12 V a z pohledu norem vyhovující pro topenářské aplikace. Výrobce ukončil v přechozích letech výrobu tohoto čerpadla a v současnosti na trhu není dostupné jiné stejnosměrné oběhové čerpadlo pro tyto aplikace. Tento bod tak do určité míry ztratil význam. Stejnosměrné měniče s MPPT jsou v celé škále výkonů dostupné pro fotovoltaické aplikace. V posledních několika letech se ale zvýšila i komerční dostupnost stejnosměrných měničů s MPPT řízením, které jsou optimalizované přímo pro použití s termoelektrickými

moduly a generátory dosahující účinností až 99 %, viz například [146]. Z výše uvedených důvodů vyplynulo, že bod týkající se softwarového řízení stejnosměrného měniče nemá tudíž opodstatnění (práce se soustředí na předchozí cíle).

4. Použité metody

4.1. Simulační nástroj pro hodnocení uplatnění termoelektrického generátoru

Dříve publikované práce vztahující se k přeměně tepla spalin domovních kotlů předpokládají a matematicky popisují termoelektrický generátor jako termoelektrický modul nebo moduly s výměníky na teplé a studené straně. Na rozdíl například od automobilových termoelektrických aplikací, ve kterých je uvažován i vliv zpětného tlaku generátoru na motor, v aplikacích využívajících odpadního tepla domovních spalovacích zařízení bývají generátory uvažovány jako svébytná zařízení oddělená od systému jako celku. Možný negativní vliv generátoru (tepelný a tlakový) na provoz tepelného zařízení a zdroj tepla uvažovaný není. V případě využití tepla spalin domovních kotlů a jejich vychlazování generátorem až za kotlem by ale z praktických důvodů vliv generátoru na provoz kotle a na funkčnost odkouření postihnout být měl. Množství využitelného tepla spalin tím bude omezené, stejně tak i výkon generátoru a v důsledku toho i možné provedení termoelektrických modulů. Předkladaný simulační nástroj proto uvažuje jako zdroj tepla spaliny, kouřovod a komín jako součást odvodu tepla. Účelem simulačního nástroje je při zvolených parametrech predikovat optimální podobu termoelektrických modulů pro dosažení maximálního výkonu termoelektrického generátoru, a tím ukázat možný výkonový limit termoelektrické přeměny.

4.1.1. Popis návrhu simulačního nástroje a jednotlivých výpočtů

Zjednodušeně je postup výpočtu proveden následovně. Jsou vypočítány parametry spalin a proveden výpočet odkouření. Z výpočtu odkouření vyplývá, kolik tepla se spalinám odebere průchodem odkouřením a jaké budou spaliny dosahovat teploty na výstupu z komína. Pokud bude teplota spalin na výstupu z komína vyšší než je teplota rosného bodu, spaliny obsahují teplo, které je možné jim dodatečně odebrat. Z výpočtu odkouření vyplývá přibližné množství tohoto tepla. Následuje výpočet termoelektrického generátoru, jehož cílem je navržení konstrukce generátoru tak, aby bylo zajištěno, že spalinám se odebere pouze přebytečné teplo, nebude docházet ke kondenzaci spalin a současně budou splněna teplotní a tlaková kritéria výpočtu odkouření. Detailněji jsou jednotlivé výpočty provedeny následovně:

a) Výpočet parametrů spalin

Vstupními parametry pro výpočet spalin jsou: typ paliva (prvkový rozbor paliva), výhřevnost paliva, hmotnostní tok paliva, přebytek vzduchu, teplota a relativní vlhkost spalovacího vzduchu a nadmořská výška. Výpočet parametrů spalin je založený na stechiometrických výpočtech objemu spalin, které vychází z chemických reakčních rovnic. Cílem výpočtu je získat termofyzikální vlastnosti spalin, jejich entalpii a hmotnostní tok na výstupu z kotle. Tyto výstupní parametry výpočtu slouží následně jako

vstupní parametry výpočtu termoelektrického generátoru. Výrobci kotlů obvykle udávají v informačních listech vedle jmenovitého tepelného výkonu kotlů i typ paliva, spotřebu paliva při jmenovitém výkonu, maximální teplotu spalin, hmotnostní tok spalin při jmenovitém výkonu a další hodnoty, které mohou být použity jako vstupní parametry výpočtu. Podstatné parametry jsou proto v některých případech známy. Výpočty spalin jsou prováděny v souladu s [147]. Uvažují ustálený provoz spalovacího zařízení a objem spalin vzniklý při dokonalém spalování paliva.

Paliva

Jako palivo jsou ve výpočtech uvažovány dřevní pelety, palivové dřevo ze smrku a buku, mostecké hnědé uhlí a ostravské černé uhlí. Prvkový rozbor paliv uvažovaných paliv je uvedený v Tab. 4.1. V případě spalování hnědého a černého uhlí jsou parametry paliv převzaty pro typ paliva ořech 1.

Tab. 4.1 Prvkový rozbor paliv vzhledem k surovému stavu a jejich výhřevnost [148-151]

Typ paliva	W ^r (%)	A ^r (%)	C ^r (%)	H ^r (%)	S ^r (%)	N ^r (%)	O ^r (%)	Q _i ^r (MJ/kg)
Dřevní pelety	7,61	0,16	47,05	6,33	0,03	0,29	38,50	17,15
Palivové dřevo (buk)	19,00	0,83	34,17	4,88	0,00	0,18	40,94	14,42
Palivové dřevo (smrk)	20,00	0,34	42,72	5,18	0,04	0,08	31,63	15,92
Hnědé uhlí	29,61	6,84	44,89	3,46	0,77	0,56	13,87	17,60
Černé uhlí	8,00	20,20	63,62	2,23	0,43	0,72	4,81	27,30

Uvažované kotle

Výpočet je potřeba ověřit pro existující kotle a jejich známé parametry. Z rešerše uvedené v příloze P2 vyplynuly konkrétní kotle, které mají minimální požadavky na elektrický příkon. Zástupci těchto kotlů, uvedení v Tab. 4.1, jsou uvažováni ve výpočtech. Vedle teplovodních kotlů jsou ve výčtu zahrnuta i krbová kamna s teplovodními výměníky.

b) Výpočet odtahu spalin

Úměrně spalovacímu zařízení a parametrům spalin musí být navrženo odkouření. Termoizolační vlastnosti kouřovodu a komínu a účinná výška komínu ovlivňují ochlazení spalin a tedy i množství tepla, které bude možné generátorem odebrat. Na tomto místě se setkává závislost ochlazování a tlakové ztráty. Tlaková ztráta na straně spalin je odvislá od provedení generátoru, provedení odkouření, souvisí i s teplotou spalin. Výrobci kotlů obvykle udávají minimální požadovaný tah komínu, případně i maximální tah komínu a průměr kouřovodu. Minimální tah komínu ve výpočtu může být převzatý od výrobce kotle nebo zjištěný výpočtem podle normy. Průměr odkouření může být převzatý od výrobce nebo zvolený. Pokud je volený, je pak zvolen tak, aby nejmenší rychlost spalin v odkouření nebyla menší než $0,5 \text{ ms}^{-1}$ jak požaduje norma ČSN 73 4201.

Výpočet spalínové trasy

Výpočet spalínové trasy je teplotní a tlakový výpočet pro zajištění odvodu spalín při mezních provozních podmínkách kotle a proměnném venkovním vlivu (teploty vzduchu, větru). Výpočet je provedený na základě platné normy ČSN EN 13384-1 (73 4206), „Komíny – Tepelně technické a hydraulické výpočtové metody – Část 1: Samostatné komíny“, z roku 2016. Je použita výpočtová metoda pro nevyvážené komíny s použitím podkladů uvedených v [142; 147; 152; 153]. Podle výpočtu uváděného v normě musí být účinný komínový tah v sopouchu větší než tlakové ztráty v kouřovodu, a výška komína taková, aby pokryla tlakové ztráty. Kritériem výpočtu je zajištění nižší tlakové ztráty spalínové cesty, než je dispoziční tlak v komínovém průduchu - statický tah, podtlak nebo přetlak od ventilátoru. Rovnost tlakových podmínek se u komína ověřuje v sopouchu. V uvažované aplikaci kotle s generátorem předpokládám komín s přirozeným tahem (termický komín), ve kterém je účinný tah vytvořený pouze vztlakem spalín teplejších než je teplota venkovního vzduchu. Vzduchový nebo spalovací ventilátor kotle uvažovaný není, takže ani případný přetlak. Předpokládám, že tento komín bude vedený uvnitř budovy, provedený buď jako vícevrstvý komín bez vzduchové mezery nebo vícevrstvý komín s nevětranou vzduchovou mezerou. Vzduchová mezera slouží jako tepelněizolační nevětraná vrstva pro zvýšení tepelného odporu termického komínu. Účinná výška komína je volena minimálně 5 m a délka kouřovodu dosahuje maximálně čtvrtiny účinné výšky komína, jak požaduje norma ČSN 73 4201.

Rosný bod spalín

Teplota rosného bodu omezuje množství tepla, které je možné spalínám odebrat, a tím limituje případný výkon generátoru. Rosný bod spalín je teplotou, při které dochází k nasycení par ve spalínách a jejich kondenzaci, především na studených plochách odkouření, kde důsledkem toho nastává i nízkoteplotní koroze. Pro různé typy paliv a kotlů se výsledná hodnota rosného bodu liší, protože teplota rosného bodu spalín je závislá na chemickém složení spalovaného paliva (obsahu vody, vodíku, síry, chlóru), na druhu ohniště kotle a přebytku vzduchu, částečně i na koncentraci popílku, který působí jako kondenzační jádra [147]. V případech spalování sirnatých paliv – uhlí, se síra obsažená v palivu významně podílí na zvýšení teploty rosného bodu. Spálením síry vzniká oxid siřičitý, který následně ve spalínách reaguje na oxid siřový, který kondenzuje dřív než samostatný oxid siřičitý nebo vodní pára.

V dostupné literatuře se objevuje několik způsobů výpočtu teploty rosného bodu. Norma ČSN EN 13 384-1 uvádí vztah teploty rosného bodu vodních par při známém obsahu CO_2 ve spalínách:

$$t_{\text{sp}}^{\text{r}} = \frac{4077,9}{23,6448 - \ln(p_{\text{D}})} - 236,67, \quad (4.1)$$

kde p_{D} je parciální tlak vodní páry. Jiný způsob výpočtu uvádí Dlouhý [147]. Pokud jsou známy parametry vystupující v rovnici, přibližný vztah pro výpočet rosného bodu je následující:

$$t_{\text{sp}}^{\text{r}} = t_{\text{k}} + \frac{\beta \cdot \sqrt[3]{S_{\text{r}}}}{1,2266^{X_{\text{u}} \cdot A_{\text{r}}}}, \quad (4.2)$$

kde t_{k} (°C) je teplota sytosti vodní páry při parciálním tlaku vodní páry ve spalínách, β (-) součinitel volený vzhledem k přebytku vzduchu za ohništěm, S_{r} (% kg/MJ) měrná sirnatost, X_{u} (-) poměrný obsah popela v úletu a A_{r} (% kg/MJ) měrná popelnatost. Dalšími způsoby výpočtu jsou empirické vztahy podle Verhoffa, Bancherra, Perryho a Kianga [154], které umožňují spočítat rosné body par jednotlivých složek spalín. Tyto výpočetní vztahy byly také použity. Teplota spalín na stěnách odtahu spalín bude nižší než teplota spalín uprostřed průřezu odtahu. Z uváděných výpočtů toto přímo reflektuje výpočet uvedený v normě.

Pomocí zvolené konstrukce kouřovodu a komínu a vypočtené teploty rosného bodu spalin je zjištěna nejnižší přípustná teplota spalin na výstupu z komínu. Výpočtem je zjištěno, kolik tepla se spalinám odebere samostatným průchodem odkouřením a je známá nejnižší teplota spalin, které musí být na vstupu do kouřovodu, respektive výstupu z generátoru minimálně dosaženo. Tato teplota je vstupní hodnotou pro následný výpočet termoelektrického generátoru.

c) Výpočet termoelektrického generátoru

V případě, že je teplota spalin na výstupu z kotle větší než minimální požadovaná teplota spalin na vstupu do kouřovodu, která zajistí, že po průchodu spalin odkouřením nedojde v ústí komínu k jejich kondenzaci a je splněno jak teplotní tak tlakové kritérium výpočtu odtahu spalin, spaliny obsahují teplo, které je možné jim odebrat. Termoelektrický generátor je možné vřadit do spalinové trasy a je proveden jeho výpočet. Výpočet termoelektrického generátoru je založený na prostupu tepla mezi spalinami a vodou. Cílem výpočtu je vytvoření tepelného toku generátorem tak, aby na výstupu ze spalinového výměníku generátoru byla zajištěna alespoň minimální požadovaná teplota spalin na vstupu do odkouření. Následný výpočet termoelektrické části generátoru vychází z postupu používaného při návrhu termoelektrických generátorů. V prvním kroku je provedena volba výměníků, po níž následuje volba konkrétního polovodičového materiálu. V dalším kroku je hledána optimální geometrie polovodičových sloupků a optimalizace tepelným přizpůsobováním s využitím 1D analytického modelu polovodičových dvojic. Tímto způsobem je získán předběžný návrh konstrukce generátoru. V následujících textech jsou jednotlivé kroky blíže rozepsány.

Volba výměníků a souvisejících parametrů

Vzhledem k předchozím předpokladům a volbám je podoba spalinového výměníku generátoru daná. Průřez odkouření volím stejný v celé spalinové trase. V generátoru je kruhový průřez odtahu spalin zaměněný za obdélníkový průřez, který je z hlediska aplikace termoelektrických modulů po obvodu kanálu jednodušší. Spaliny tak budou procházet obdélníkovým kanálem s hladkými teplosměnnými povrchy. Tepelný odpor výměníku na straně spalin je daný geometrií tohoto kanálu a vlastnostmi proudících spalin přejatých z předchozího výpočtu spalin. Termoelektrické moduly jsou umístěné po vnějším obvodu tohoto kanálu a chlazené vratnou vodou. Podobu výměníku na straně vody je potřeba zvolit. Vzhledem k poznatkům uváděným v kapitole 1.3.4 volím hodnotu tepelného odporu vodního výměníku v intervalu 1 až 20násobku tepelného odporu výměníku na straně spalin. Předpokládám, že dosažení tohoto tepelného odporu vodního výměníku je realizovatelné a je ho možné dosáhnout kombinací různých geometrií a konstrukčních materiálů výměníku, jejichž konkrétní podoba není v tento okamžik známá. Z tohoto důvodu také neuvažuji výpočet dodatečné tlakové ztráty na straně vody a její případný příspěvek ke zvýšení příkonu oběhového čerpadla.

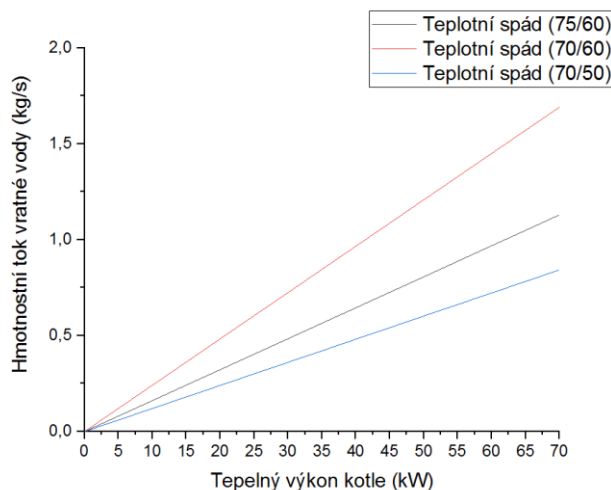
Hmotnostní tok chladicí vody a její teplotu je potřeba specifikovat. Předpokládám, že veškerá vratná voda bude procházet výměníkem generátoru. Aby nedocházelo k nízkoteplotní korozi kotlového tělesa, je teplota vratné vody uvažována minimálně o velikosti $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ⁸. Hmotnostní tok vratné vody je zvolený úměrně tepelnému výkonu kotle a předpokládanému teplotnímu spádu otopné soustavy. Lulkovičová [142] uvádí, že minimální průtok vody kotlem by měl být známý z projekčních podkladů výrobců kotlů. Ve výpočtu je minimální průtok vody stanovený z maximálního teplotního rozdílu nebo přípustné oblasti rozdílu. Teplotní spády v teplovodních soustavách se volí v rozmezí $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Obvyklé teplotní spády jsou pak 80/60, 75/60, 75/60, 70/55, 70/60 a 70/50 [155].

⁸ V případě verifikace simulačního nástroje je teplota vratné vody z praktických důvodů volena nižší.

Podle Vyhlášky č. 193/2007 Sb., „kterou se stanoví podrobnosti účinnosti užití energie při rozvodu tepelné energie a vnitřním rozvody tepelné energie a chladu“, se pro vytápění s nuceným oběhem teplotnosné látky v nevýrobních objektech volí teplota na vstupu do otopných těles do 75 °C. Vzhledem k uvažovaným teplotám vratné vody tak ve výpočtu mohou být teplotní spády 75/60, 70/60 a 70/50, kterým odpovídají příslušné hmotnostní toky chladicí vody. Velikost hmotnostního toku chladicí vody je pak spočítána podle vzorce:

$$\dot{m}_{voda} = \frac{Q}{c \cdot (t_{voda}^{výstup} - t_{voda}^{vstup})} \quad (4.3)$$

kde Q (W) je tepelný výkon kotle, c (J/kgK) je měrná tepelná kapacita vody při střední teplotě vody v otopné soustavě získaná pomocí teplotně závislých tabelovaných hodnot [156], $t_{voda}^{výstup}$ (°C) je teplota vody na výstupu z kotle a t_{voda}^{vstup} (°C) je teplota vratné vody na vstupu do kotle, respektive vstupu do termoelektrického generátoru. V generátoru dojde k ohřevu vody. Teplota vratné vody by proto mohla být uvažována i nižší. Pro zjednodušení výpočtů je ale uvažována jako minimální požadovaná teplota na vstupu do kotle.



Obr. 4.1 Závislost hmotnostního toku chladicí vody na tepelném výkonu kotle a uvažovaných teplotních spádech otopné soustavy

Volba polovodičového materiálu a souvisejících parametrů

Předpokládá se využití termoelektrických materiálů na bázi Bi_2Te_3 . Pro další postup výpočtu je potřeba znát velikost materiálových parametrů Seebeckova koeficientu, elektrické a tepelné vodivosti. Optimalizační výpočet sloupků je postavený na analytickém modelu uvažujícím konstantní materiálové parametry. Přibližné konstantní hodnoty parametrů je možné převzít z odborné literatury, např. [1]. Výrobci nebo prodejci termoelektrických modulů použitých při experimentech uváděných dále v práci [157; 36; 33] materiálové parametry modulů neuvádí. Tyto parametry ale byly nalezeny u jiného výrobce termoelektrických modulů. Vzhledem k podobnosti jednotlivých termoelektrických modulů a jejich parametrů byly hodnoty převzaty. Uvažované materiálové parametry Bi_2Te_3 polovodičů dle [158] nabývají následujících hodnot.

Seebeckův koeficient polovodiče P a N:

$$\alpha_p = (-0,003638095 \cdot T^2 + 2,74380952 \cdot T - 296,214286) \cdot 10^{-6} \frac{V}{K}, \quad (4.4)$$

$$\alpha_n = (0,001530736 \cdot T^2 - 1,08058874 \cdot T - 28,338095) \cdot 10^{-6} \frac{V}{K}. \quad (4.5)$$

Tepelná vodivost polovodiče P a N:

$$\lambda_p = (0,0000361558 \cdot T^2 - 0,026351342 \cdot T + 6,22162) \frac{W}{mK}, \quad (4.6)$$

$$\lambda_n = (0,0000334545 \cdot T^2 - 0,023350303 \cdot T + 5,606333) \frac{W}{mK}. \quad (4.7)$$

Elektrická vodivost polovodiče P a N:

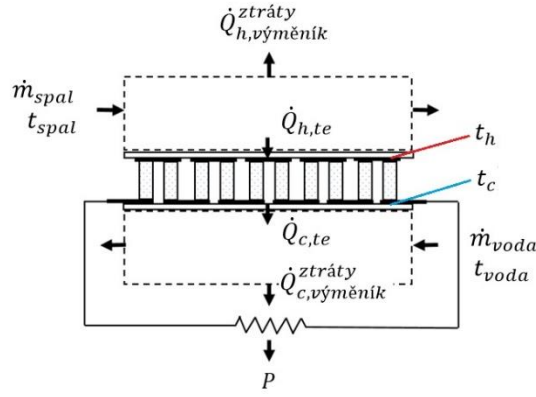
$$\sigma_p = (0,015601732 \cdot T^2 - 15,708052 \cdot T + 4466,38095) \cdot 10^2 \frac{S}{m}, \quad (4.8)$$

$$\sigma_n = (0,01057143 \cdot T^2 - 10,16048 \cdot T + 3113,71429) \cdot 10^2 \frac{S}{m}. \quad (4.9)$$

Konstantní hodnoty materiálových parametrů jsou následně získané pomocí výše uvedených teplotně závislých parametrů uvažováním střední provozní teploty (1.12), která vychází z řešení soustavy rovnic uváděných dále.

Tepelné přizpůsobování a optimalizace polovodičových sloupků

Schéma uvažovaného generátoru a jeho bilance je vyobrazená na Obr. 4.2 Schéma termoelektrického generátoru, celková energetická bilance. Hmotnostní toky médií a jejich teploty na vstupech do generátoru jsou známy. Dále je známá teplota spalin na výstupu ze spalinového výměníku a tepelný tok \dot{Q}_h , který je možné generátorem odebírat, aby v ústí komína nedocházelo k podkročení teploty rosného bodu. Optimalizace termoelektrické části generátoru je prováděna parametrickou analýzou na úrovni polovodičových dvojic, která je prováděna v počítačovém programu Maple [159], který umožňuje pracovat se symbolickými výrazy a provádět numerické výpočty. Je hledána taková geometrie sloupků a jejich množství, které zajistí, že tepelný tok generátorem ($\dot{Q}_{h,te}$) bude odpovídat požadované hodnotě tepelného toku. Parametry, které se ve výpočtu mění, jsou průřez sloupku, délka sloupku, faktor plnění, celková plocha a množství termoelektrických dvojic. Kombinací těchto parametrů je možné ovlivnit tepelnou vodivost polovodičových dvojic a výslednou hodnotu tepelného toku generátorem. Požadované hodnotě tepelného toku bude odpovídat více kombinací geometrických parametrů sloupků, při kterých bude současně dosaženo různých hodnot elektrických výkonů. Mezi těmito kombinacemi parametrů je pak vyhledávána taková kombinace, při které je i elektrický výkon generátoru maximalizovaný. Při výpočtech uvažuji, že průřezy sloupků termoelektrické dvojice jsou stejně velké a elektrická zátěž je přizpůsobená podle rovnice (1.32), aby bylo dosaženo optimální proudové hustoty pro dosažení maximálního výkonu. Celkovou plochu, kterou mohou termoelektrické dvojice zaujímat (velikost teplosměnné plochy), jsem omezil na 160 cm². Komerčně dostupné Bi₂Te₃ termoelektrické moduly se nejčastěji vyrábějí v rozměrech 4 x 4 cm. Zvolená plocha je tak ekvivalentem deseti kusů termoelektrických modulů.



Obr. 4.2 Schéma termoelektrického generátoru, celková energetická bilance

Hledané výkonové parametry generátoru jsou funkcí teplot T_h a T_c , které se nacházejí na rozhraní výměníků a termoelektrických dvojic a které nejsou známy a musí být nalezeny numerickým řešením soustavy rovnic (4.10) a (4.11), vzniklé spojením 1D kontaktního modelu termoelektrické dvojice a výpočtu výměníků podle metody ε -NTU. Následující postup výpočtu je přejatý od Hendrickse a Lustbadera [84], [85]:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{h,te} = N \cdot \left(\alpha_{pn} I T_h - \frac{1}{2} I^2 \left(\frac{L}{\sigma_p A_{te}} + \frac{L}{\sigma_n A_{te}} + 2R_{kont} \right) + \left(\frac{\lambda_p A_{te}}{L} + \frac{\lambda_n A_{te}}{L} \right) \right. \\ \left. \cdot (T_h - T_c) \right) = \frac{(T_{spal} - T_h) \cdot (1 - \beta_h^{te})}{\left(\frac{1}{\dot{m}_{spal} c_{p,spal} \varepsilon_{spal} (1 - \beta_{spal})} + R_h^{te} \right)}, \end{aligned} \quad (4.10)$$

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{c,te} = N \cdot \left(\alpha_{pn} I T_c + \frac{1}{2} I^2 \left(\frac{L}{\sigma_p A_{te}} + \frac{L}{\sigma_n A_{te}} + 2R_{kont} \right) + \left(\frac{\lambda_p A_{te}}{L} + \frac{\lambda_n A_{te}}{L} \right) \right. \\ \left. \cdot (T_h - T_c) \right) = \frac{(T_c - T_{voda})}{\left(\frac{(1 - \beta_{voda})}{\dot{m}_{voda} c_{p,voda} \varepsilon_{voda}} + R_c^{te} \right) \cdot (1 - \beta_c^{te})}, \end{aligned} \quad (4.11)$$

kde N je počet termoelektrických dvojic (-), I je elektrický proud v zátěži (A), L je délka polovodičových sloupků (m), A_{te} je průřez polovodičových sloupků (m^2), T_{spal} je teplota spalín (K), T_{voda} je teplota chladicí vody (K), \dot{m}_{spal} je hmotnostní tok spalín (kg/s), \dot{m}_{voda} je hmotnostní tok chladicí vody (kg/s), $c_{p,spal}$ je měrná tepelná kapacita spalín (J/kgK), $c_{p,voda}$ je měrná tepelná kapacita chladicí vody (J/kgK), ε_{spal} je efektivita spalínového výměníku (-), ε_{voda} je efektivita chladicího výměníku (-), R_h^{te} je součet tepelných odporů na rozhraní termoelektrických modulů a spalínového výměníku (K/W), R_c^{te} je součet tepelných odporů na rozhraní termoelektrických modulů a chladicího výměníku (K/W) a bety jsou ztrátové součinitele vyjadřující poměr ztrát ku přenášenému tepelnému toku. Respektive, β_{spal} (-) je ztrátový součinitel vyjadřující velikost tepelných ztrát spalínového výměníku

$$\beta_{spal} = \frac{\dot{Q}_{h,vyměník}^{ztráty}}{\dot{Q}_{h,vyměník}^{vstup} - \dot{Q}_{h,vyměník}^{výstup}}, \quad (4.12)$$

β_h^{te} (-) ztrátový součinitel vyjadřující velikost tepelných ztrát na rozhraní spalínového výměníku a termoelektrického modulu

$$\beta_h^{te} = \frac{\dot{Q}_{h,te}^{ztráty}}{\dot{Q}_{h,te}}, \quad (4.13)$$

β_c^{te} (-) je ztrátový součinitel vyjadřující velikost tepelných ztrát na rozhraní termoelektrického modulu a vodního výměníku

$$\beta_c^{te} = \frac{\dot{Q}_{c,te}^{ztráty}}{\dot{Q}_{c,te}}, \quad (4.14)$$

a β_{voda} (-) je ztrátový součinitel vyjadřující velikost tepelných ztrát vodního výměníku

$$\beta_{voda} = \frac{\dot{Q}_{c,výměník}^{ztráty}}{\dot{Q}_{c,výměník}^{výstup} - \dot{Q}_{c,výměník}^{vstup}}. \quad (4.15)$$

Tepelné ztráty $\dot{Q}_{h,výměník}^{ztráty}$ a $\dot{Q}_{c,výměník}^{ztráty}$ (W) představují tepelné ztráty radiací a konvekci nevyužitých ploch, tepelné ztráty kondukci vlivem mechanické konstrukce a tepelných mostů na straně spalínového a vodního výměníku, $\dot{Q}_{h,te}^{ztráty}$ a $\dot{Q}_{c,te}^{ztráty}$ (W) představují tepelné ztráty na rozhraní termoelektrického modulu se spalínovým a vodním výměníkem.

Tok spalín v uvažované aplikaci má významně menší tepelnou kapacitu. Platí tak, alespoň přibližně

$$\frac{C_{min}}{C_{max}} \rightarrow 0, \quad (4.16)$$

kde C_{min} (J/K) je minimální tepelná kapacita (kapacita spalín) procházející výměníkem a C_{max} (J/K) je maximální tepelná kapacita (kapacita chladicí vratné vody) procházející výměníkem. Předpokládám, že je proto možné uvažovat izotermální rozhraní a efektivita výměníků je následně počítaná podle vztahů:

$$\varepsilon_{spal} = 1 - e^{\left[-\frac{k_h S_h}{C_{min}}\right]}, \quad (4.17)$$

$$\varepsilon_{voda} = 1 - e^{\left[-\frac{k_c S_c}{C_{min}}\right]}, \quad (4.18)$$

kde k_h a k_c (W/m²K) jsou součinitelé prostupu tepla na straně spalín a vody a S_h a S_c (m²) jsou velikosti teplosměnných ploch.

4.1.2. Příkony oběhových čerpadel

Výkon získaný termoelektrickou přeměnou by bylo vhodné porovnat s příkony oběhových čerpadel. Nejeefektivnější nízkopříkonová oběhová čerpadla určená pro aplikace v soustavách teplovodního vytápění, uváděná v příloze P3, mají elektrické příkony v rozmezí 3 W až 18 W. Příkon čerpadel se odvíjí od jejich účinnosti, objemového průtoku vody a tlakové ztráty otopné soustavy. Je možné jej spočítat pomocí vztahu:

$$P = \frac{\rho g \dot{Q} H}{\eta}, \quad (4.19)$$

kde ρ je hustota vody (kg/m^3), g tíhové zrychlení (m/s^2), \dot{Q} objemový průtok vody (m^3/s), dopravní výška čerpadla (m) a η účinnost čerpadla (-). Minimální požadovaný průtok vody kotlem je známý, účinnost by bylo možné odhadnout na základě účinností uváděných v příloze P3, ale není známá dopravní výška nebo tlaková ztráta otopné soustavy jako funkce tepelného výkonu kotle. Vzhledem k dřívějším závěrům, předpokládané ceně termoelektrických komponent a zvoleném požadavku redukováného výkonu předpokládám, že elektrický výkon dosahující úrovně 8 W bude možné považovat za dostačující, alespoň pro minimální provoz s uváděnými nízkopříkonovými čerpadly.

4.1.3. Metodika ověření simulačního nástroje

Verifikace simulačního nástroje bude provedena porovnáním hodnot získaných výpočtem simulačního nástroje s hodnotami získanými z měření sestaveného experimentálního generátoru, který je uvedený v následující kapitole. Výpočet je provedený pro parametry uváděné v Tab. 4.2.

Tab. 4.2 Vstupní parametry výpočtu pro ověření simulačního nástroje

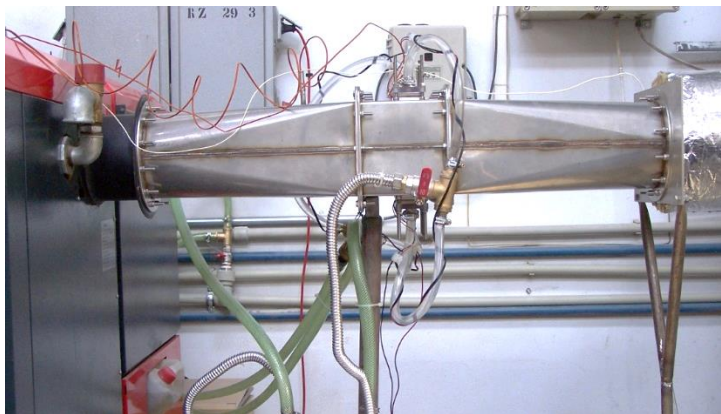
Parametr	Označení	Hodnota	Jednotka
Teplota spalín	t_{spal}	196	(°C)
Hmotnostní tok spalín	\dot{m}_{spal}	0,016	(kg/s)
Teplota chladicí vody	t_{voda}	20 / 30 / 38	(°C)
Hmotnostní tok chladicí vody	\dot{m}_{voda}	0,097	(l/s)
Tepelný odpor spalínového výměníku		0,240	(K/W)
Tepelný odpor chladicí výměníku		0,087	(K/W)
Ztrátový součinitel spalínového výměníku	β_{spal}	0,1	(-)
Ztrátový součinitel přechodu spal. výměníku/modul	β_h^{te}	0	(-)
Ztrátový součinitel přechodu modul/vod. výměník	β_c^{te}	0	(-)
Ztrátový součinitel vodního výměníku	β_{voda}	0	(-)
Počet kusů použitých termoelektrických modulů		4	ks
Typ použitých termoelektrických modulů		TG 12-6-L	
Rozměr použitého termoelektrického modulu		40,05 x 44,66 x 3,90	(mm)
Tepelný odpor termoelektrického modulu		1,52	(K/W)
Počet termoelektrických dvojic jednoho modulu		127	(-)
Celkový počet termoelektrických dvojic	N	508	(-)
Délka polovodičových sloupků	L	1,63	(mm)
Šířka polovodičových sloupků		1,40	(mm)
Průřez polovodičových sloupků	A_{te}	1,96	(mm ²)
Tloušťka keramických desek		0,72	(mm)
Tepelná vodivost keramických desek		24,5	(W/mK)
Elektrický kontaktní odpor spojovacích vodičů	R_{kont}	0,003	(Ω)

4.2. Experimentální termoelektrický generátor pro automatický teplovodní kotel

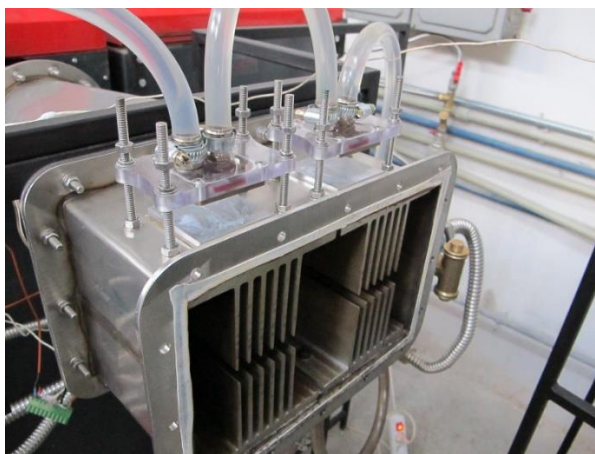
4.2.1. Navržená konstrukce experimentálního termoelektrického generátoru

V rámci řešení dizertační práce byl zkompletován externí termoelektrický generátor vyobrazený na Obr. 4.3. Jako zdroj tepla slouží automatický teplovodní kotel na dřevní pelety Verner A.251 o nominálním výkonu 25 kW, který je říditelný v rozsahu 7,5-28 kW. Termoelektrický generátor je tvořený čtyřmi termoelektrickými moduly umístěnými po obvodu segmentu obdélníkového průřezu, vyobrazeném na Obr. 4.4. Vzhledem k dostupnosti a parametrům komerčních termoelektrických modulů a potřebě jejich tepelného přizpůsobení s tepelnými výměníky bylo zvoleno, že konstrukce tohoto generátoru nebude provedená s hladkými stěnami, jak je zvažováno v předchozím textu, ale s žebrovaným spalínovým výměníkem zajišťujícím nižší tepelný odpor na straně spalin, aby bylo možné se přiblížit elektrickému výkonu, kterým bude možné napájet oběhová čerpadla. Takováto aplikace generátoru není vhodná pro běžné užití, z pohledu norem je problematická, generátor je ale určený pouze pro experimenty a ověření simulačního nástroje.

Konstrukce vlastního termoelektrického generátoru se skládá z nerezového šasi s výměníky a termoelektrickými moduly, z difuzoru a konfuzoru. Příruby šasi jsou svařence z ohýbaného nerezového plechu tloušťky 1 mm a přírubových desek tloušťky 3 mm. Příruby jsou vzájemně spojené šroubovými spoji. Obdélníkové příruby s termoelektrické moduly ve střední části mají po obvodu čtyři otvory. Těmi prochází zfrézované základny hliníkových extrudovaných profilů ze slitiny AW 6060, které jsou na straně spalin opatřeny podélnými žebry (viz Obr. 4.4). Z vnější strany hliníkových profilů jsou umístěny termoelektrické moduly. Odvod přiváděného tepla a chlazení termoelektrických modulů zajišťují komerčně dostupné vodní chladiče, vyrobené z měděných plechů o rozměrech 55 x 5 x 5 mm. V měděném plechu jsou vyfrézovány jemné drážky, které jsou ostříkovány vratnou chladicí vodou. Krycí plechy měděných základů jsou vyrobeny z polykarbonátu. Termoelektrické moduly jsou upnuté mezi hliníkové bloky a vodní chladiče šroubovými spoji. Šrouby, respektive závitové tyče jsou vetknuté do hliníkových bloků. Mezi vnitřní stěnou příruby a spalínovým žebrovaným výměníkem je umístěna rohož z křemičitanové izolace (Fiberfrax) o tloušťce 2 mm. V původní variantě bylo celé šasi z vnější strany po obvodu dodatečně tepelně izolováno. Pro uchycení dvou vrstev žáruvzdorné izolace bylo na jednotlivé příruby navařeno ostění. Na vnější straně obdélníkových přírub byly po obvodu umístěny dvě vrstvy křemičitanové izolace ve formě papíru. Konfuzor a difuzor byl izolovaný rohoží křemičitanové izolace. Druhá vrstva, společná jak pro konfuzor a difuzor, tak obdélníkový segment, byla tvořena kamennou minerální vatou (Rockwool) opatřenou hliníkovou fólií. Pro potřeby experimentů bylo potřeba manipulovat s jednotlivými částmi konstrukce generátoru i obměňovat termoelektrické moduly. Při manipulaci docházelo k narušování tepelně-izolačního materiálu a uvolňování jeho vláken, které jsou v případě použitých křemičitanových izolací karcinogenní. Z tohoto důvodu bylo rozhodnuto, že generátor nebude při experimentech izolován a zůstane nezateplený. V důsledku toho narostly ztráty radiací a konvekcí nevyužitých ploch a snížil se i dosahovaný elektrický výkon. V simulačním nástroji jsou tyto ztráty zohledněny koeficientem β_{spal} .



Obr. 4.3 Pohled na nezaizolované šasi termoelektrického generátoru umístěné na výstupním hrdle automatického kotle



Obr. 4.4 Pohled na sestavený segment termoelektrického generátoru, na kterém jsou po obvodu umístovány termoelektrické moduly

Na generátoru jsou umístěny čtyři termoelektrické moduly. V průběhu experimentů bylo použito několik typů Bi_2Te_3 termoelektrických modulů, konkrétněji TEG-127-230-32e, TG 12-6-01L a TEG 10W, vždy po čtyřech kusech od každého typu modulů. Výsledky jsou prezentované při použití termoelektrických modulů TG 12-6-01L. Jsou to Bi_2Te_3 termoelektrické moduly, jejichž výrobcem je společnost Marlow Ind. Jsou určeny pro dlouhodobý provoz při teplotách do 200 °C, krátkodobě až 250 °C. Vnitřní odpor jednoho modulu je přibližně 2 Ω , koeficient termoelektrické účinnosti výrobce udává $ZT = 0,73$. Při jmenovitých parametrech udávaných výrobcem dosahuje modul výkonu 6 W [157].

4.2.2. Experimentální měření výkonových charakteristik

Termoelektrický generátor byl připojen na automatický teplovodní kotel A 251.1. Vliv tlakové ztráty termoelektrického generátoru na tah komínu a provoz kotle byl v případě automatického kotle eliminován, protože kotel je vybavený vzduchovým ventilátorem, vytvářejícím ve vzduchospalinové trati přetlak. Jako palivo pro spalování byly použity dřevní pelety. Po dosažení jmenovitého výkonu kotle byly měřeny zátěžné křivky termoelektrického generátoru. Teplota spalin v průběhu měření dosahovala teploty 196 °C. Teplota chladicí vody byla udržována na hodnotách 20 °C, 30 °C a 38 °C. Průtok chladicí vody byl udržován na hodnotě 350 l/h.

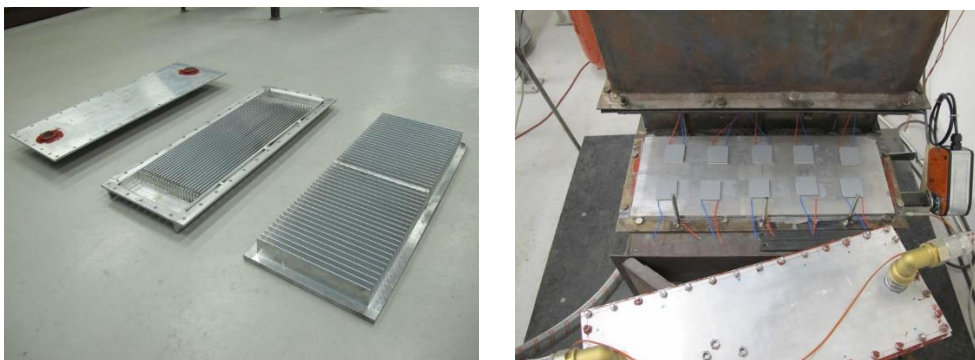
Měření elektrického výkonu generátoru bylo prováděno pomocí elektronické odporové zátěže, digitálního voltmetru a ampérmetru. Výkon generátoru byl zjištěn měřením zátěžného odporu a odpovídajícího elektrického proudu a napětí generátoru v zátěži. Pomocí jednotlivých měření při různých zátěžných odporech byla získána zátěžná charakteristika pro danou teplotu spalín a teplotu chladicí vody a následně získána výkonová křivka generátoru vzhledem k těmto teplotám. Pro měření teplot byly využity měřicí karty Advantech Adam 4017 a 4018+ a termočlánky typu K.

4.3. Experimentální krbová vložka s termoelektrickým generátorem

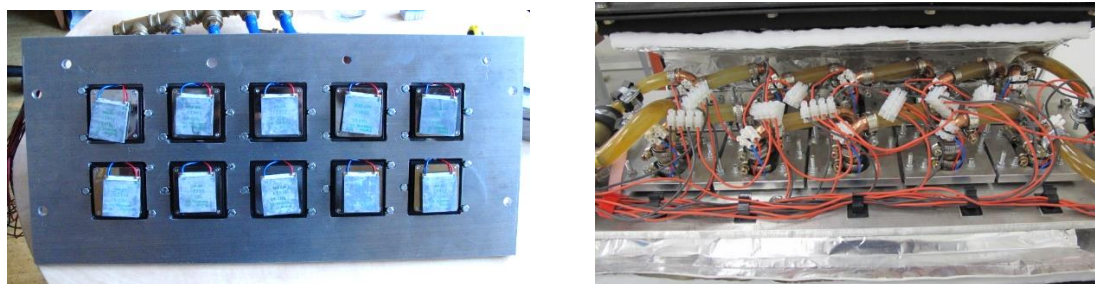
V souvislosti s řešením dizertační práce vznikla experimentální i krbová vložka s termoelektrickým generátorem. Původním cílem při konstrukci tohoto generátoru bylo zkonstruovat bezhlučnou mikrokogenerační jednotku, která by využívala tepelné energie vzniklé spalováním levných tuhých paliv a produkovala větší elektrický výkon než poskytoval generátor pro automatický teplovodní kotol, uváděný v předchozím textu. Předpokládaný elektrický výkon byl do 50 W. Účelem generátoru bylo i zkoumání možné eliminace vlivu teplotních polí na elektrický výkon termoelektrického generátoru pomocí architektury stejnosměrných měničů.

4.3.1. Navržená konstrukce experimentálního termoelektrického generátoru

Spalovací komora krbové vložky je navržena tak, aby splňovala požadavky na emise a účinnost volbou geometrie spalovací komory, množstvím a rozmístěním spalovacích vzduchů a umístěním jednotlivých výměníků. Výsledný tepelný výkon sestavené krbové vložky s teplovodním výměníkem, vyobrazené na Obr. 4.7, je 10 kW. Konstrukci generátoru představuje spalínový výměník umístěný v horní části krbové vložky, který zajišťuje přívod tepla pro termoelektrické moduly. Pro experimenty jsou využívány nízkoteplotní Bi_2Te_3 termoelektrické moduly TG 12-6-01L, jejichž parametry jsou uvedené v příloze. Chlazení termoelektrických modulů zajišťoval nejdříve zkonstruovaný monolitický teplovodní výměník z lehkých slitin předehřívající vratnou vodu (viz Obr. 4.5), který byl poté nahrazen samostatnými chladicími bloky (viz Obr. 4.6). Součástí sestavené krbové vložky je elektromechanické zařízení, které reguluje průtok spalín kanálem s výměníkem termoelektrické části tak, aby nedocházelo k překročení maximální provozní teploty použitých termoelektrických modulů, kterou výrobce udává 230 °C krátkodobě [157]. Termoelektrických modulů je použito deset kusů a jsou spojeny do sério-parallelní konfigurace.



Obr. 4.5 Pohled na zkonstruovaný vodní chladič termoelektrického generátoru a spalínový výměník (vlevo) a pohled na termoelektrické moduly umístěné na spalínovém výměníku (vpravo)



Obr. 4.6 Pohled zdola na samostatné vodní chladiče termoelektrického generátoru a termoelektrické moduly (vlevo) a pohled shora (vpravo)



Obr. 4.7 Pohled na krbovou vložku s termoelektrickým generátorem umístěnou na měřicí váze v laboratorní zkušební kotlů v průběhu zkoušek

4.4. Měřicí aparatury termoelektrických generátorů

4.4.1. Zkušební stand termoelektrických modulů

Výrobci a prodejci termoelektrických modulů poskytují v katalogových listech modulů pouze omezené množství informací. Pro potřeby simulací a experimenty by bylo vhodné znát parametry Seebeckova koeficientu, elektrického odporu, tepelné vodivosti a koeficientu termoelektrické účinnosti jako funkce teploty a znát také reálné výkonové parametry modulu při definovaných teplotách. V průběhu řešení

dizertační práce jsem navrhl a zkonstruoval zkušební zařízení, jež využívá metody steady-state a je pro tyto účely určené. Zařízení může být současně modifikováno pro měření spojená s posuzováním životnosti a spolehlivosti termoelektrických modulů.



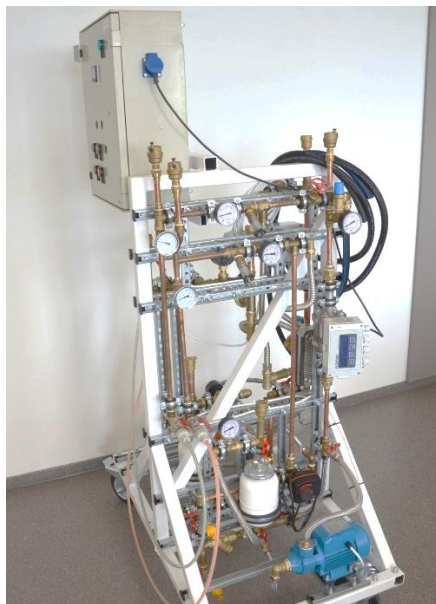
Obr. 4.8 Pohled na zkonstruovaný zkušební stand. Vlevo se nachází elektrovýzbroj zkušebního zařízení a prvky řízení, vpravo samostatný stand.

Mechanická konstrukce zkušebního stendu je tvořená dvěma nosnými duralovými deskami spojenými závitovými tyčemi. K horní nosné desce jsou přes tepelně-tlakové izolační desky upnuty dva topné tlustovrstvé odpory o výkonu 300 W nebo 600 W jednotlivě, napájené při napětí 48 V stejnosměrných. Chlazení měřeného termoelektrického modulu zajišťuje spodní chladicí blok vyrobený z ertacetalu a měděné frézované základny. Mezi chladicím vodním blokem a topnými odpory jsou umístěny dva výměnné měděné poniklované rozváděcí bloky o stejném čtvercovém průřezu, jako má měřený termoelektrický modul, aby mohlo být uvažováno 1D vedení tepla. Po výšce rozváděcích bloků jsou umístěny termočlánky. Z naměřených teplot termočlánky je vyhodnocený tepelný tok vstupující a vystupující z měřeného termoelektrického modulu. Měření probíhá za současného měření zátěžových charakteristik termoelektrického modulu. Tlak, kterým musí být modul v průběhu měření zatížen, je vyvozený pohybovým šroubem a krokovým motorem přes ozubenou řemenici, respektive tlačnou deskou přenášející sílu od pohybové desky a nástrojových pružin na měřicí desku s tenzometry a následně na základnu vodního bloku a měřeného termoelektrického modulu. Měření stlačení termoelektrických modulů bylo původně provedeno jako nepřímé měření založené na odměřování stlačení nástrojových pružin bezkontaktním indukčním snímačem vzdálenosti. Toto měření ale bylo nahrazeno tenzometrickým měřením a zaznamenáváním pomocí měřicí karty National Instruments a programu LabView. Protože měření neprobíhá ve vakuu, ale v atmosférických podmínkách, v okolí měděných rozváděcích bloků a měřeného modulu je umístěna tepelně-izolační vrstva.

4.4.2. Laboratorní chladicí smyčka termoelektrického generátoru a zkušebního stendu termoelektrických modulů

Pro potřeby experimentů a simulací reálných provozních podmínek termoelektrických generátorů by mělo být možné nastavit v širokém rozsahu průtoky chladicí vody a její teplotu. Tyto parametry by mělo být také možné udržovat stabilní. Vybavení v laboratorní zkušebně toto neumožňuje, protože je využíván zásobník s chladicí vodou, používanou jak pro chlazení kotle tak chlazení generátoru. Komplikovaný je i dohřev vody před vstupem do generátoru, aby bylo možné měřit parametry

generátoru při proměnných teplotách chladicí vody. Z tohoto důvodu jsem navrhl a následně sestavil chladicí smyčku, která po projení s kompresorovým chladicím agregátem umožňuje regulovat parametry chlazení (viz Obr. 4.9). Je určená pro měření parametrů sestavených termoelektrických generátorů a pro měření parametrů termoelektrických modulů se zkušebním stendem.



Obr. 4.9 Pohled na zkonstruovanou chladicí smyčku

4.4.3. Testovací smyčka s nízkopříkonovým čerpadlem

Pro ověření konceptu chlazení teplovodního kotle nízkopříkonovým čerpadlem napájeným termoelektřinou byla sestavena testovací hydraulická smyčka s nízkopříkonovými čerpadly. Z řešených čerpadel uvedených v příloze vyplynuly dva možné přístupy. Použití oběhového čerpadla napájeného buď stejnosměrným nebo střídavým proudem. Provádění prvotních testů a ověřování napájení čerpadla generátorem, kdy čerpadlo by bylo umístěné přímo v chladicí smyčce kotle, by nebylo praktické. Testování by bylo komplikované z hlediska experimentů, vyhodnocování jejich výsledků a bylo i zbytečně nákladné při dlouhodobějším provozu. V průběhu řešení práce jsem proto navrhl a sestavil testovací hydraulickou smyčku, která je vybavená škrticím prvkem simulujícím hydraulický odpor otopné soustavy. Smyčka je vyobrazena na Obr. 4.9 a je možné ji propojit s laboratorní chladicí smyčkou kotlů umístěnou ve zkušebním měřicím koutě, kde probíhají zkoušky kotlů. Je schopná vyvozovat dispoziční tlak v okruhu kotle nízkopříkonovým čerpadlem napájeným termoelektřinou z odpadního tepla.



Obr. 4.10 Pohled na testovací hydraulickou smyčku vybavenou nízkopříkonovými mokroběžnými oběhovými čerpadly

5. Výsledky simulací a výsledky měření

5.1. Experimentální ověření provozních parametrů termoelektrického generátoru na automatickém kotli

5.1.1. Výsledky měření

Maximálního výkonu generátoru bylo dosaženo při sériovém spojení termoelektrických modulů. Generátor dosahoval výkonu 11 W. V následujících tabulkách jsou shrnuta měření svorkového napětí, napětí a proudu v zátěži při daném zátěžném odporu a měření zkratového proudu. Z hodnot uváděných v tabulkách byla následně extrapolována předpokládaná zátěžná charakteristika generátoru jako funkce teploty chladicí vody při jmenovitém výkonu kotle (viz Obr. 5.1). Hodnoty optimálních zátěžných napětí, proudů a výkonů byly následně dopočteny a graficky znázorněny na výkonové charakteristice na Obr. 5.2. Měření generátoru probíhalo v několika etapách. Detailnější popis měření a dosažené výsledky jsou uvedeny v publikacích [160; 161].

Tab. 5.1 Změřené hodnoty při $t_{spal} = 196\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $t_{voda} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$

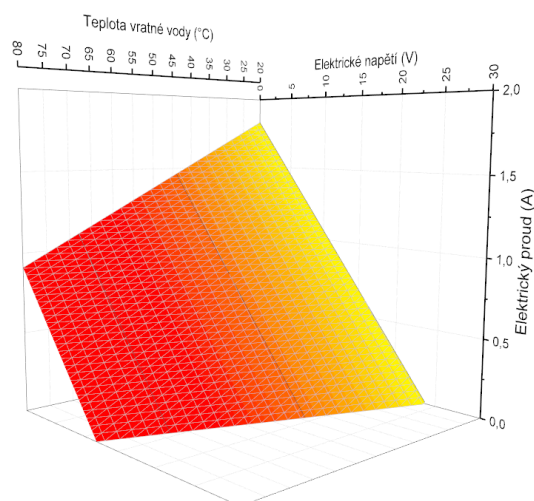
Svorkové napětí U_{oc} (V)	Zátěžný odpor R_L (Ω)	Zátěžné napětí U_L (V)	Zátěžný proud I_L (A)	Zkratový proud I_{sc} (A)
23,76	-	-	0	-
-	6,72	8,06	1,20	-
-	0	0	-	1,85

Tab. 5.2 Změřené hodnoty při $t_{spal} = 196\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $t_{voda} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$

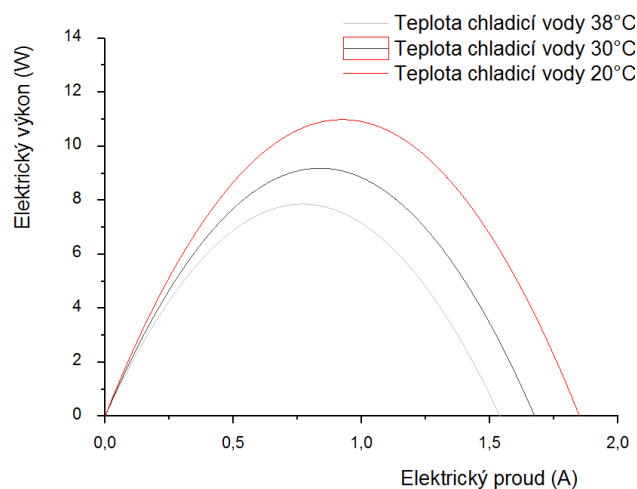
Svorkové napětí U_{oc} (V)	Zátěžný odpor R_L (Ω)	Zátěžné napětí U_L (V)	Zátěžný proud I_L (A)	Zkratový proud I_{sc} (A)
21,94	-	-	0	-
-	6,63	7,43	1,12	-
-	0	0	-	1,68

Tab. 5.3 Změřené hodnoty při $t_{spal} = 196\text{ °C}$ a $t_{voda} = 38\text{ °C}$

Svorkové napětí U_{oc} (V)	Zátěžný odpor R_L (Ω)	Zátěžné napětí U_L (V)	Zátěžný proud I_L (A)	Zkratový proud I_{sc} (A)
20,40	-	-	0	-
-	6,57	6,83	1,04	-
-	0	0	-	1,54



Obr. 5.1 Zátěžovací charakteristika termoelektrického generátoru při nominálním výkonu kotle a proměnných teplotách vratné vody



Obr. 5.2 Výkonová křivka termoelektrického generátoru při nominálním výkonu kotle a proměnných teplotách vratné vody

5.1.2. Diskuze výsledků

V případě sériového spojení modulů se neprojevovaly v takové míře výkonové difference mezi jednotlivými moduly. V případě serio-paralelního nebo paralelního spojení byly výkonové ztráty větší. Rozdíly ve výkonech jsou způsobené především rozdílnými okrajovými teplotami na modulech, které mohou být způsobené polohou modulů (generátor byl ve vodorovné poloze), rozdílnou velikostí tlaku na modul a jeho špatným rozložením (bylo zjištěno později) a tomu odpovídají velikostí kontaktních odporů. Maximální dosažitelný výkon výrazně klesá se vzrůstající teplotou chladicí vody. Vzhledem k tepelné kapacitě vody a součinitelům přestupu tepla na straně vody, se rozdíl v teplotách vody projeví daleko výrazněji než rozdíl v teplotách spalin.

Na základě tohoto generátoru a měření pak byly provedeny i navazující akademické práce [162; 163]. Nicméně vypovídací hodnota generátoru je omezená. Samotný generátor není vhodný pro dlouhodobý provoz s kotli a neměl by být takto ani provozován nebo replikován pro použití v domácnostech, protože nevyhovuje příslušným normám. Jedná se čistě o experimentální zařízení pro ověření simulací a případné zkoušky s napájením čerpadel. Vytváří dodatečnou tlakovou ztrátu ve vzduchospalinové cestě. V případě měření s automatickým kotlem, který je vybavený vzduchovým ventilátorem, je vliv přirozeného tahu komína na provoz kotle potlačený a stejně tak i tlaková ztráta generátoru a jeho vliv na provoz kotle.

5.1.3. Ověření simulačního nástroje

Tab. 5.4 Porovnání experimentálně změřených hodnot a hodnot získaných ze simulačního nástroje při $t_{spal} = 196\text{ °C}$ a $t_{voda} = 20\text{ °C}$

	Svorkové napětí U_{oc} (V)	Zátěžný odpor R_L (Ω)	Zátěžné napětí U_L (V)	Zátěžný proud I_L (A)	Zkratový proud I_{sc} (A)	Maximální výkon P_{MAX} (W)
Simulace	20,13	6,72	8,60	1,27	-	10,16
Experiment	23,76	6,72	8,06	1,20	1,85	10,98
Rozdíl	-3,63	-	0,54	0,07	-	-0,82
Procentuální rozdíl	15,3 %	-	6,70 %	5,83 %	-	7,47 %

Tab. 5.5 Porovnání experimentálně změřených hodnot a hodnot získaných ze simulačního nástroje při $t_{spal} = 196\text{ °C}$ a $t_{voda} = 30\text{ °C}$

	Svorkové napětí U_{oc} (V)	Zátěžný odpor R_L (Ω)	Zátěžné napětí U_L (V)	Zátěžný proud I_L (A)	Zkratový proud I_{sc} (A)	Maximální výkon P_{MAX} (W)
Simulace	19,08	6,63	8,53	1,19	-	8,93
Experiment	21,94	6,63	7,43	1,12	1,68	9,19
Rozdíl	-2,86	-	1,10	0,07	-	-0,26
Procentuální rozdíl	13,0 %	-	14,8 %	6,25 %	-	2,83 %

Tab. 5.6 Porovnání experimentálně změřených hodnot a hodnot získaných ze simulačního nástroje při $t_{\text{spal}} = 196\text{ °C}$ a $t_{\text{voda}} = 38\text{ °C}$

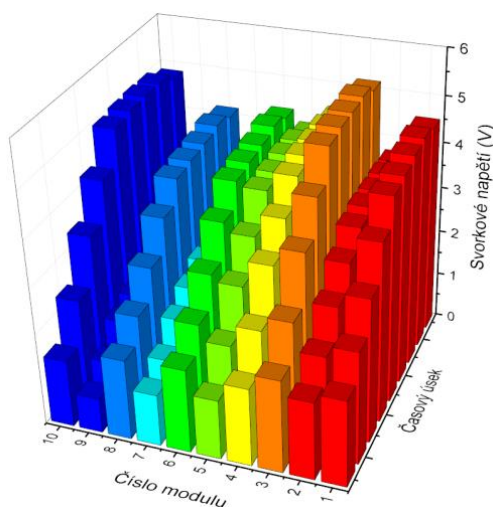
	Svorkové napětí U_{oc} (V)	Zátěžný odpor R_L (Ω)	Zátěžné napětí U_L (V)	Zátěžný proud I_L (A)	Zkratový proud I_{sc} (A)	Maximální výkon P_{MAX} (W)
Simulace	18,21	6,57	7,76	1,18	-	7,99
Experiment	20,40	6,57	6,83	1,04	1,54	7,85
Rozdíl	-2,19	-	0,93	0,14	-	0,14
Procentuální rozdíl	10,7 %	-	13,6 %	13,5 %	-	1,79 %

5.1.4. Diskuze výsledků

Mezi jednotlivými výsledky je možné vidět odchylky. Výrazné odchylky jsou u svorkového napětí a parametrů v zátěži – zátěžného napětí a zátěžného proudu. Model neumožňoval získat hodnoty zkratového proudu, tyto hodnoty proto nejsou uváděny. Pro výpočet bylo přijato množství zjednodušujících předpokladů a provedena řada voleb. Jedna z voleb, která může výrazně ovlivňovat výsledky je uvažování materiálových parametrů, převzatých od jiného výrobce, než kterým jsou moduly, použité při měření. Na zjištěných hodnotách se mohou také výrazně podílet vlivy ztrát, které nebyly z velké většiny vyjádřeny a mohou mít vliv.

5.2. Experimentální ověření provozních parametrů krbové vložky s termoelektrickým generátorem

V průběhu prvotních zkoušek krbové vložky s generátorem byla na vstup chladiče generátoru přiváděna chladicí voda o teplotě 27 °C . Zatížený generátor dosahoval elektrického výkonu 21 W. Samostatným měřením jednotlivých termoelektrických modulů ale bylo zjištěno, že velká část elektrického výkonu se maří ve vzájemně propojených modulech, mezi kterými byly značné výkonové rozdíly. Tuto skutečnost demonstruje Obr. 5.3, na kterém je zaznamenán průběh svorkového napětí samostatných termoelektrických modulů při rozhořívání paliva.



Obr. 5.3 Průběh svorkového napětí termoelektrických modulů při rozhořívání paliva v krbové vložce

5.2.1. Diskuze výsledků

Rozdílné výkony modulů nastávaly v důsledku rozdílných okrajových teplot na modulech, které v průběhu experimentů dále přetrvávaly. Předpokládalo se, že k tomu bude docházet, ale v menší míře. Nevhodná konstrukce jednotlivých mechanických částí a jejich špatná rovinatost, především monolitického vodního bloku způsobila, že jednotlivé termoelektrické moduly nebyly v dobrém tepelném kontaktu jak s chladicím vodním výměníkem, tak spalínovým výměníkem a bylo přistoupeno k úpravě části konstrukce, zmiňované v kapitole 4.3.1 a na Obr. 4.6. Jednotlivé termoelektrické moduly byly vybaveny samostatnými chladicími vodními bloky, které byly utahovány přes talířové pružiny kompenzující případné teplotní dilatace. Na teplosměnných plochách v kontaktu s termoelektrickými moduly byly původně aplikovány teplovodivé směsi, po úpravě konstrukce byly použity grafitové podložky o tloušťce 1 mm. Pro snížení kontaktních tepelných odporů byly moduly silově zatíženy. Velikost tlaku na moduly byla odvozována od deformace pružin. Po úpravě krbové vložky a generátoru došlo k navýšení elektrického výkonu, ten se ale v čase rychle měnil. Pravděpodobně vlivem tepelných mostů v konstrukci, která držela horní nosnou desku, k níž byly upnuty i vodní bloky, došlo k jejímu prohnutí a zhoršení tepelného kontaktu termoelektrických modulů. V průběhu těchto experimentů a měření parametrů generátoru současně došlo k poškození termoelektrických modulů, které je uváděno v textu v kapitole 1.2.2. Z tohoto důvodu nejsou v této části textu prezentována další data. Od dalších experimentů na krbové vložce bylo dočasně upuštěno a následovaly činnosti vedoucí ke stavbě zkušebního zařízení.

5.3. Simulační nástroj pro hodnocení uplatnění termoelektrického generátoru

5.3.1. Případová studie 1: zplyňovací kotel na dřevo

Simulační výpočet je prováděn pro parametry blízké zplyňovacímu kotel Viadrus U22 Economy o jmenovitém tepelném výkonu 16 kW spalujícím dřevo. Soupis parametrů vztahující se k výpočtu spalín a odkouření (hodnoty přejaté od výrobce, hodnoty volené a vypočítané hodnoty) je uveden v příloze P4. Z hodnot získaných z výpočtu vyplývá maximální množství tepla využitelné generátorem. Tato hodnota je použita v následném výpočtu a simulacích vlastní termoelektrické části generátoru, která je prováděna v programu Maple. V následující tabulce jsou stručně shrnuty výchozí parametry výpočtu.

Tab. 5.5 Parametry výpočtu termoelektrického generátoru pro zplyňovací kotel na dřevo

Parametry výpočtu spalín	Označení	Hodnota	Jednotka
Typ paliva		Palivové dřevo (buk)	(-)
Tepelný výkon kotle		16	(kW)
Relativní vlhkost vzduchu		70	(%)
Teplota spalovací vzduchu		22	(°C)
Nadmořská výška		237	(m)
Teplota spalín	t_{spal}	165	(°C)
Hmotnostní tok spalín	\dot{m}_{spal}	0,012	(kg/s)
Teplotní spád		70/50	(-)
Teplota chladicí vody	t_{voda}	50	(°C)
Hmotnostní tok chladicí vody	\dot{m}_{voda}	0,192	(kg/s)
Hmotnostní tok paliva (vzhledem k uvažovanému palivu)		4,49	(kg/h)

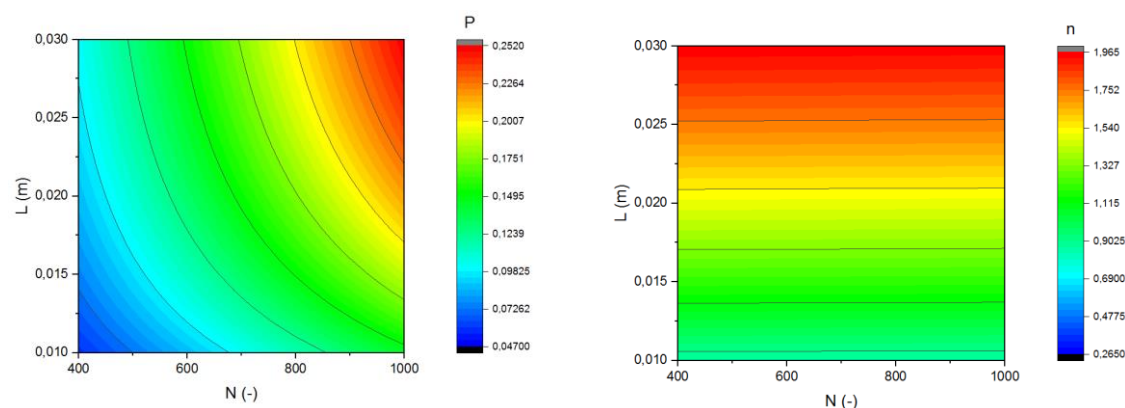
Parametry výpočtu spalín	Označení	Hodnota	Jednotka
Přebytek vzduchu (vzhl. k uvažovaném hm. toku spal.)		2,34	(-)
Průměr kouřovodu		0,160	(m)
Požadovaný komínový tah		13	(Pa)
Parametry termoelektrického generátoru			
Ztrátový součinitel spalínového výměníku	β_{spal}	0,03	(-)
Ztrátový součinitel přechodu spal. výměníku/modul	β_h^{te}	0	(-)
Ztrátový součinitel přechodu modul/vod. výměník	β_c^{te}	0	(-)
Ztrátový součinitel vodního výměníku	β_{voda}	0	(-)
Množství tepla odebratelné termoelektrickým generátorem	$\dot{Q}_{h,te}$	250	(W)
Elektrický kontaktní odpor spojovacích vodičů	R_{kont}	0,003	(Ω)

Výsledky

Při zadaných parametrech ze simulace vyplynulo, že maximální dosažitelný výkon je 0,25 W, při použití 1000 polovodičových dvojic o šířce 1,5 mm, délce 3,0 mm a celkovém faktoru plnění 0,3. Výsledky simulací jsou uvedeny v Tab. 5.6. Průběh výkonu a účinnosti v závislosti na délce polovodičů a množství polovodičových dvojic pro konstantní faktor plnění jsou vyobrazené na Obr. 5.4.

Tab. 5.6 Dosažené výsledky

Celková plocha (m ²)	Šířka sloupku (mm)	Délka sloupku L (mm)	Počet TE dvojic N (-)	Faktor plnění F (-)	Teplota th (°C)	Teplota tc (°C)	Tepelný tok $\dot{Q}_{h,te}$ (W)	Výkon P (W)	Účinnost (%)
0,016 ≤	0,0015	0,003	1000	0,3	91,9	51,1	12,8	0,25	1,95
0,016 ≤	0,0015	0,030	100	0,3	91,9	51,1	1,29	0,02	1,96



Obr. 5.4 Průběh výkonu a účinnosti polovodičových sloupků o šířce 1,5 mm a faktoru plnění 0,3 v závislosti na jejich délce a množství polovodičových dvojic

5.3.2. Případová studie 2: křbová kamna na dřevo

Simulační výpočet je prováděn pro parametry blízké křbovým kamnům ABX, typ 067 o jmenovitém tepelném výkonu 13 kW spalující dřevo. Pro dané parametry kouřovodu a komínu (shodné s předchozím

výpočtem a parametry uvedenými v příloze P4, průměr odkouření je roven 150 mm). Z hodnot získaných z výpočtu vyplývá maximální množství tepla využitelné generátorem. Tato hodnota je použita v následném výpočtu a simulacích vlastní termoelektrické části generátoru. V následující tabulce jsou stručně shrnuty výchozí parametry výpočtu.

Tab. 5.7 Parametry výpočtu termoelektrického generátoru pro krbová kamna na dřevo

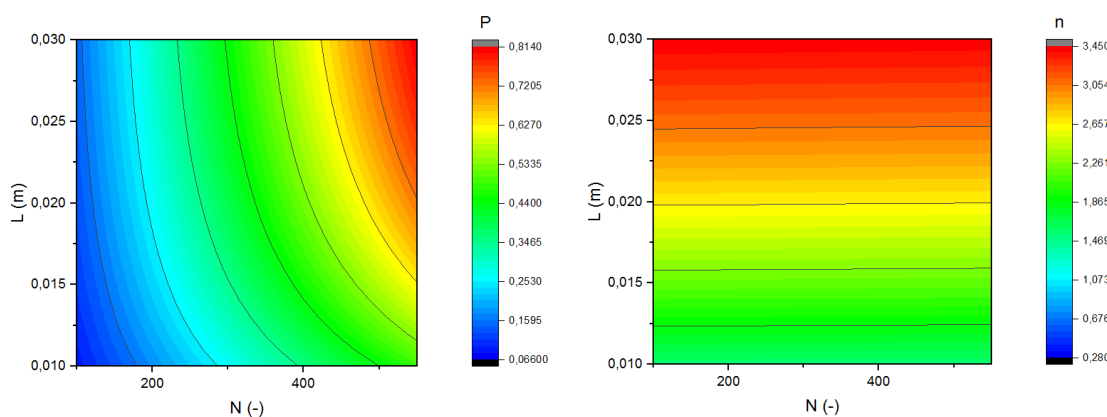
Parametry výpočtu spalin	Označení	Hodnota	Jednotka
Typ paliva		Palivové dřevo (buk)	(-)
Tepelný výkon kotle		13	(kW)
Relativní vlhkost vzduchu		70	(%)
Teplota spalovací vzduchu		22	(°C)
Nadmořská výška		237	(m)
Teplota spalin	t_{spal}	264	(°C)
Hmotnostní tok spalin	\dot{m}_{spal}	0,009	(kg/s)
Teplotní spád		70/50	(-)
Teplota chladicí vody	t_{voda}	50	(°C)
Hmotnostní tok chladicí vody	\dot{m}_{voda}	0,156	(kg/s)
Hmotnostní tok paliva (vzhledem k uvažovanému palivu)		4,04	(kg/h)
Přebytek vzduchu (vzhl. k uvažovaném hm. toku spal.)		1,89	(-)
Průměr kouřovodu		0,150	(m)
Požadovaný komínový tah		12	(Pa)
Parametry termoelektrického generátoru			
Ztrátový součinitel spalínového výměníku	β_{spal}	0,03	(-)
Ztrátový součinitel přechodu spal. výměníku/modul	β_h^{te}	0	(-)
Ztrátový součinitel přechodu modul/vod. výměník	β_c^{te}	0	(-)
Ztrátový součinitel vodního výměníku	β_{voda}	0	(-)
Množství tepla odebratelné termoelektrickým generátorem	$\dot{Q}_{h,te}$	370	(W)
Elektrický kontaktní odpor spojovacích vodičů	R_{kont}	0,003	(Ω)

Výsledky

Při zadaných parametrech ze simulace vyplynulo, že maximální dosažitelný výkon je 0,81 W, při použití 550 polovodičových dvojic o šířce 2,0 mm, délce 30 mm a celkovém faktoru plnění 0,3. Výsledky simulací jsou uvedeny v Tab. 5.8. Průběh výkonu a účinnosti v závislosti na délce polovodičů a množství polovodičových dvojic pro konstantní faktor plnění jsou vyobrazené na Obr. 5.5.

Tab. 5.8 Výsledky simulací

Celková plocha (m ²)	Šířka sloupku (mm)	Délka sloupku L (mm)	Počet TE dvojic N (-)	Faktor plnění F (-)	Teplota t _{th} (°C)	Teplota t _{tc} (°C)	Tepelný tok Q _{h,te} (W)	Výkon P (W)	Účinnost (%)
0,016 ≤	0,002	0,030	550	0,3	127,1	50,3	23,7	0,81	3,43
0,001 ≤	0,001	0,030	100	0,3	127,3	50,2	1,09	0,04	3,50



Obr. 5.5 Průběh výkonu a účinnosti polovodičových sloupků o šířce 1,5 mm a faktoru plnění 0,3 v závislosti na jejich délce a množství polovodičových dvojic.

5.3.3. Případová studie 3: zplyňovací kotel na uhlí

Výpočet termoelektrického generátoru nemůže být v případě zplyňovacího kotle na hnědé uhlí prováděn pro stejné parametry odkouření jako v předchozích případech, protože není splněno tlakové kritérium výpočtu. I při změně parametrů odkouření zůstává množství odebratelného tepla pro generátor limitované a nebylo dosaženo podmínek vhodných pro výpočet termoelektrické části.

Tab. 5.9 Parametry výpočtu termoelektrického generátoru pro zplyňovací kotel na hnědé uhlí

Parametry výpočtu spalin	Označení	Hodnota	Jednotka
Typ paliva		Hnědé uhlí	(-)
Tepelný výkon kotle		27	(kW)
Relativní vlhkost vzduchu		70	(%)
Teplota spalovací vzduchu		22	(°C)
Nadmořská výška		237	(m)
Teplota spalin	t_{spal}	190	(°C)
Hmotnostní tok spalin	\dot{m}_{spal}	0,019	(kg/s)
Teplotní spád		75/60	(-)
Teplota chladicí vody	t_{voda}	65	(°C)
Hmotnostní tok chladicí vody	\dot{m}_{voda}	0,435	(kg/s)
Hmotnostní tok paliva (vzhledem k uvažovanému palivu)		3,65	(kg/h)
Přebytek vzduchu (vzhl. k uvažovaném hm. toku spal.)		2,15	(-)
Průměr kouřovodu		0,160	(m)
Požadovaný komínový tah		21	(Pa)
Parametry termoelektrického generátoru			

Parametry výpočtu spalín	Označení	Hodnota	Jednotka
Ztrátový součinitel spalínového výměníku	β_{spal}	0,03	(-)
Ztrátový součinitel přechodu spal. výměníku/modul	β_h^{te}	0	(-)
Ztrátový součinitel přechodu modul/vod. výměník	β_c^{te}	0	(-)
Ztrátový součinitel vodního výměníku	β_{voda}	0	(-)
Množství tepla odebratelné termoelektrickým generátorem	$\dot{Q}_{h,te}$	0	(W)
Elektrický kontaktní odpor spojovacích vodičů	R_{kont}	0,003	(Ω)

5.3.4. Diskuze výsledků

Z výsledků provedených simulací vyplývá, že navržená konstrukce termoelektrického generátoru provedeného ve vzduchospalinové cestě jako hladkého kanálu je nevhodná pro dosažení výkonů, které by se přibližovaly výkonům potřebným pro napájení oběhových čerpadel.

Závěry a vlastní přínos práce

Cílem práce bylo zjistit, zda je možné při využití nízko-teplotních Bi_2Te_3 termoelektrických materiálů a modulů přeměňujících nízkopotenciální odpadní teplo spalín kotlů získat dostatečné množství elektrické energie pro napájení nízkopříkonových oběhových čerpadel, a tím zajistit chlazení kotlů. Aby bylo možné na položenou otázku odpovědět, byl vytvořen simulační nástroj, který byl následně validován a verifikován pomocí experimentálního termoelektrického generátoru sestaveného pro tyto účely. Při porovnání výsledků ze simulačního nástroje a výsledků změřených zatěžovacích charakteristik generátoru umístěného na automatickém teplovodním kotli byla zjištěna přibližná shoda výsledků. Předpokládám, že simulační nástroj je tak schopný podávat informace s přijatelnou mírou spolehlivosti.

Z provedených simulací vyplývá, že termoelektrický generátor využívající Bi_2Te_3 nízko-teplotních termoelektrických materiálů provedený jako externí zařízení s designem odpovídajícím požadavkům technických norem, konkrétněji se zcela hladkými teplosměnnými povrchy ve spalínovém traktu generátoru, nebude poskytovat dostatečný elektrický výkon pro napájení nízkopříkonových oběhových čerpadel. Pokud by byly v konstrukci generátoru využity komerčně dostupné termoelektrické moduly s geometriemi polovodičů lišících se od optimální podoby geometrií nalezených při simulacích, dosažený výkon by byl ještě nižší. V této podobě je zajištění dostatečného přestupu tepla ve vzduchospalínové trase problematické a výkon generátoru značně limitovaný. Výrazný vliv na výkon generátoru má i teplota vratné vody (při nižších teplotách výkon výrazně narůstá). Průměr odkouření, délka nezaizolované části kouřovodu nebo tepelný odpor komínu neomezují výkon generátoru, protože spaliny se při nízkém součiniteli přestupu tepla na malé ploše generátoru prakticky neochlazují. V případě, že by se podařilo dosáhnout výraznějšího vychlazení spalín, jak vyšším součinitelem přestupu tepla nebo větší teplosměnnou plochou, bylo by nutné brát v potaz i vliv odkouření, které by výkon omezovalo. Pokud by spaliny na výstupu z kotlů dosahovaly vyšších teplot a současně byl zajištěn lepší přestup tepla na straně spalín, například použitím turbulátorů narušujících mezní podvrstvu, bylo by možné dosáhnout větších elektrických výkonů. Vliv relativně vysoké teploty vratné vody by ale zůstal. Pokud by bylo možné využít pro chlazení chladnější vodu (při realizaci například z podlahového vytápění), mohlo by to mít výrazný dopad na výkon. Experimentálními termoelektrickými generátory bylo demonstrováno, že je možné dosáhnout větších výkonů. Nicméně, v případě experimentálního generátoru provozovaného s kotlem na pelety, bylo většího elektrického výkonu dosaženo zvýšením přestupu tepla na straně spalín použitím žebrovaných hliníkových chladičů s menšími tepelnými odpory. Takto provedený generátor je z pohledu provozu a příslušných norem ale nevhodný. Může být i nebezpečný, proto důrazně nedoporučuji takovouto konstrukci provozovat na kotlích v domácnostech. Jedná se čistě o experimentální zařízení pro ověření simulačního nástroje. Předmětem dalšího postupu by měl být hledání kompromisu mezi intenzifikací přestupu tepla ve spalínové části generátoru a provozními požadavky kladenými na provedení celé vzduchospalínové trasy. Například s využitím sestaveného simulačního nástroje. Vzhledem k průběhu teplot na hranách

polovodičových dvojic, které nedosahovaly mezních provozních teplot, by mělo být také současně zvažováno umístění termoelektrických modulů do oblastí vyšších teplot, blíže ke spalovací komoře.

Cílem prováděné optimalizace bylo dosažení maximálního výkonu. Zjistit, jakých je možné na omezené teplosměnné ploše možné dosáhnout výkonů. Tomu odpovídají i geometrické parametry polovodičů: délka sloupků, jejich průřez nebo faktor plnění. Jedná se o limitní případ. V případě, že by v budoucnu došlo k nalezení konstrukční podoby termoelektrického generátoru, která by mohla zajišťovat dosažení požadovaných výkonů, měla by být vedle výkonové optimalizace zvažována i optimalizace pro dosažení optimální ceny. V případě realizace generátoru by pak měl být předběžně vytvořený návrh analyzovaný pro různé návrhové i nenávrhové stavy pomocí numerických metod nebo softwarových aplikací jako je například ANSYS nebo Comsol.

Domnívám se, že v současnosti není kvůli vysoké ceně využívání komerčně dostupných termoelektrických materiálů a termoelektrických modulů pro dosažení velkých elektrických výkonů perspektivní. Proto se práce zabývá pouze velmi malými výkony. Domnívám se ale také, že v blízké době by mohlo dojít ke zjednodušení a zefektivnění výrobních postupů termoelektrických komponent na bázi některého z perspektivních termoelektrických materiálů pracujících za vyšších teplot. Pokud dojde i k snížení výrobní ceny, bylo by možné očekávat, že se takovéto termoelektrické materiály a moduly prosadí v širším měřítku (byť by to bylo oproti původním představám široké akademické obce pouze v malém rozsahu) a v případě aplikací ve spojení s domovními spalovacími zařízení by toto mohlo být způsobem jak zajistit samostatný provoz spalovacích zařízení nezávisle na elektrické rozvodné síti.

V rámci řešení dizertační práce byla provedena rešerše termoelektrických generátorů. Z této rešerše vznikl přehled historicky významných termoelektrických generátorů, vyplynuly jednotlivé konstrukční směry, dosahované výkony a účinnosti termoelektrických generátorů a v neposlední řadě byly nalezeny i informace související s jejich konstrukcí. V návaznosti na to a související teorii byly postupně navrženy a zkonstruovány dva experimentální termoelektrické generátory. Prvním generátorem byl termoelektrický generátor pro automatický teplovodní kotel na dřevní pelety. Tento generátor byl změřen s několika typy termoelektrických modulů. Mezi experimenty byly provedeny drobné konstrukční úpravy a došlo tím postupně k navýšení jeho elektrického výkonu. V souvislosti s měřeními v laboratořích vyvstala potřeba zajistit stabilní chlazení generátoru. Původní laboratorní chlazení neumožňovalo zajistit konstantní průtok a teplotu chladicí vody v požadovaném rozsahu. Komplikovalo to průběh experimentů i následné vyhodnocování změřených dat. Z tohoto důvodu byla poté navržena a sestavena chladicí smyčka s PID regulátorem, která ve spojení s kompresorovým chladicím agregátem umožňuje udržování stabilních podmínek chlazení. Druhým navrženým a sestaveným termoelektrickým generátorem byla krbová vložka s termoelektrickými moduly. I u tohoto generátoru došlo k několika konstrukčním úpravám a navýšení jeho elektrického výkonu. Při experimentech se ale také podařilo významně poškodit několik termoelektrických modulů. Před těmito experimenty byly moduly kontrolovány pouze zběžně. Předpokládalo se, že jejich parametry korespondují s parametry udávanými výrobcí. Po experimentech s krbovou vložkou byla provedena rešerše měřicích metod termoelektrických modulů a na základě této rešerše navrženo několik přístupů měření a ověřování parametrů termoelektrických modulů. Bylo zvoleno, že rychlé orientační měření vnitřního odporu termoelektrických modulů (jehož změna indikuje případné změny ve struktuře termoelektrických modulů), bude prováděno pomocí ZRLC metru a měření výkonových parametrů modulů bude prováděno zkušební aparaturou využívající metody steady-state. ZRLC měřicí přístroj byl následně pořízen. Termoelektrické moduly byly označeny, změřeny a došlo k jejich selekci do skupin podle stavu poškození. Měřicí aparatura, která využívá metody steady-state, byla navržena a poté i zkonstruována. Po selekci modulů došlo k dalším měřením termoelektrického generátoru na teplovodním kotli. Po provedení rešerše parametrů komerčně dostupných nízkoemisních kotlů a čerpadel bylo zhodnoceno, že

výkony generátorů jsou dostatečné pro napájení nízkopříkonových čerpadel. Bylo proto přistoupeno k návrhu experimentální smyčky, která by umožnila napájení čerpadel a pokusy s termoelektrickým generátorem nezávisle na provozu kotle, aby nedošlo k nechtěným provozním stavům kotle a jeho případnému přehřátí. Tato zkušební smyčka byla následně sestavena a čerpadla v tomto okruhu zběžně odzkoušena. Tato dizertační práce poskytuje teoretické zázemí pro další zájemce o uvedenou problematiku a naznačuje možné směry pro další výzkumné aktivity.

Seznam publikací

Vlastní publikace vztahující se k tématu dizertační práce

- [A1] BRAZDIL, Marian a Jiri POSPISIL. Thermoelectric Power Generation Utilizing the Waste Heat from a Biomass Boiler. *Journal of Electronic Materials* [online]. 2013, **42**(7), 2198-2202 [cit. 2019-07-23]. DOI: 10.1007/s11664-013-2570-7. ISSN 0361-5235. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11664-013-2570-7>
- [A2] BRÁZDIL, Marian, Ladislav ŠNAJDÁREK, Petr KRACÍK a Jiří POSPÍŠIL. Automatic Biomass Boiler with an External Thermoelectric Generator. *Acta Polytechnica* [online]. 2014, **54**(1), s. 6-9 [cit. 2017-01-11]. DOI: 10.14311/AP.2014.54.0006. ISBN 10.14311/AP.2014.54.0006. Dostupné z: <https://ojs.cvut.cz/ojs/index.php/ap/article/view/2039>
- [A3] BRÁZDIL, Marian, Otakar ŠTELCL, Luděk JANÁK a Jiří POSPÍŠIL. *Maximum output power of the flue gas thermoelectric generator utilizing the waste heat from a small- scale biomass boiler*. 1. Brno: Brno University of Technology, 2014. s. 20-20. ISBN: 978-80-214-4931- 2.
- [A4] BRÁZDIL, Marian a Jiří POSPÍŠIL. A Way to Use Waste Heat to generate Thermoelectric Power. *Acta Polytechnica* [online]. 2012, **52**(4), s. 21-25 [cit. 2017-01-11]. Dostupné z: <https://ojs.cvut.cz/ojs/index.php/ap/article/download/1578/1410>
- [A4] BRÁZDIL, Marian. Možnosti využití termoelektrických jevů pro výrobu elektrické energie z odpadního tepla. *TZB-info* [online]. Praha, 2013, 12. 8. 2013, **4** [cit. 2018-04-09]. ISSN 1801-4399. Dostupné z: <https://energetika.tzb-info.cz/kogenerace/10220-moznosti-vyuziti-termoelektrickych-jevu-pro-vyrobu-elektricke-energie-z-odpadniho-tepla>
- [A6] BRÁZDIL, Marian. Peltierovy články pro výrobu elektrické energie. In: *Energie z biomasy XII: sborník příspěvků ze semináře*. Brno, 2011, 2011, s. 23-28.

Ostatní vlastní publikace

- [B1] ŠNAJDÁREK, Ladislav; Jiří POSPÍŠIL a Marian BRÁZDIL. Heat transfer in rotor stator cavity. *EPJ Web of Conferences*, 2015, roč. 92, č. 2015, s. 558-562. ISSN: 2100-014X.

- [B2]** POLÁČIK Ján, Marian BRÁZDIL a Jiří POSPÍŠIL. Generování vodíku pulzní elektrolýzou. In *ENERGIE Z BIOMASY XVI, Sborník příspěvků z konference*. 1. Brno: VUT v Brně, 2015. s. 93-99. ISBN: 978-80-214-5286- 2.
- [B3]** HRNČÍŘOVÁ, Michaela, Marian BRÁZDIL a Jiří POSPÍŠIL. Prachové částice v ovzduší. In *ENERGIE Z BIOMASY XIV: Sborník přednášek z konference Energie z biomasy XIV*. 1. Brno: VUT v Brně, 2013. s. 84-88. ISBN: 978-80-214-4775- 2.
- [B4]** HRNČÍŘOVÁ, Michaela, Marian BRÁZDIL a Jiří POSPÍŠIL. Detection of particulate matter on the flue gas of biomass. *Proceedings of Abstracts*. 1. Brno: Brno University of Technology, 2014. s. 32-32. ISBN: 978-80-214-4931- 2.

Seznam obrázků

Obr. 1.1 Termoelektrická dvojice.....	3
Obr. 1.2 Vznik Peltierova jevu na spojích vodičů [6]	4
Obr. 1.3 Vznik Thomsonova jevu [6].....	5
Obr. 1.4 Průběh sledovaných veličin v pevných látkách v závislosti na koncentraci nosičů náboje [10]6	
Obr. 1.5 Vznik kontaktního napětí na rozhraní polovodičů typu P a N	8
Obr. 1.6 Polovodičová termoelektrická dvojice jako zdroj elektrické energie.....	9
Obr. 1.7 Polovodičová termoelektrická dvojice v Π -konfiguraci	9
Obr. 1.8 Časová osa dosahovaných hodnot bezrozměrného koeficientu termoelektrické účinnosti různých skupin termoelektrických materiálů [14].....	10
Obr. 1.9 Průběh účinnosti termoelektrické přeměny při uvažování konstantního bezrozměrného koeficientu termoelektrické účinnosti [18].....	11
Obr. 1.10 Dosahované výkony v závislosti na velikosti bezrozměrného koeficientu termoelektrické účinnosti [19].....	11
Obr. 1.11 Znázornění elektrických a tepelných toků uvnitř termoelektrického sloupku (vlevo) a uvnitř termoelektrické dvojice (vpravo)	14
Obr. 1.12 Srovnání velikostí konvenčního bulk provedení termoelektrického modulu s thin film provedení termoelektrického mikromodulu [29].....	17
Obr. 1.13 Pořizovací cena termoelektrických modulů v závislosti na maximální provozní teplotě termoelektrických modulů.....	18
Obr. 1.14 Účinnost termoelektrické přeměny vybraných termoelektrických modulů provozovaných při optimálních provozních teplotách	19
Obr. 1.15 Pohled na poškozený termoelektrický modul	20
Obr. 1.16 Schéma parazitní konfigurace termoelektrického generátoru [18]	22
Obr. 1.17 Automatický teplovodní kotel na dřevní pelety s termoelektrickým generátorem [88].....	24
Obr. 1.18 Průběh elektrického proudu a výkonu polovodičové dvojice v závislosti na délce sloupku (vlevo) a průběh účinnosti polovodičové dvojice v závislosti na délce sloupku (vpravo) [25]	25
Obr. 1.19 Elektrický příkon automatických kotlů při minimálním 30% tepelném výkonu kotle	29
Obr. 1.20 Elektrický příkon automatických kotlů při jmenovitém 100% tepelném výkonu kotle.....	29
Obr. 1.21 Maximální elektrický příkon automatických kotlů	29
Obr. 1.22 Elektrický příkon zplyňovacích kotlů při minimálním 30% tepelném výkonu kotle.....	30
Obr. 1.23 Elektrický příkon zplyňovacích kotlů při jmenovitém 100% tepelném výkonu kotle.....	30
Obr. 1.24 Maximální elektrický příkon zplyňovacích kotlů	30
Obr. 4.1 Závislost hmotnostního toku chladicí vody na tepelném výkonu kotle a uvažovaných teplotních spádech otopné soustavy	44
Obr. 4.2 Schéma termoelektrického generátoru, celková energetická bilance.....	46

Obr. 4.3 Pohled na nezaizolované šasi termoelektrického generátoru umístěné na výstupním hrdle automatického kotle	50
Obr. 4.4 Pohled na sestavený segment termoelektrického generátoru, na kterém jsou po obvodu umístěny termoelektrické moduly	50
Obr. 4.5 Pohled na zkonstruovaný vodní chladič termoelektrického generátoru a spalínový výměník (vlevo) a pohled na termoelektrické moduly umístěné na spalínovém výměníku (vpravo).....	51
Obr. 4.6 Pohled zdola na samostatné vodní chladiče termoelektrického generátoru a termoelektrické moduly (vlevo) a pohled shora (vpravo)	52
Obr. 4.7 Pohled na krbovou vložku s termoelektrickým generátorem umístěnou na měřicí váze v laboratorní zkušební kotli v průběhu zkoušek	52
Obr. 4.8 Pohled na zkonstruovaný zkušební stand. Vlevo se nachází elektrovýzbroj zkušebního zařízení a prvky řízení, vpravo samostatný stand.	53
Obr. 4.9 Pohled na zkonstruovanou chladicí smyčku	54
Obr. 4.10 Pohled na testovací hydraulickou smyčku vybavenou nízkopříkonovými mokroběžnými oběhovými čerpadly	55
Obr. 5.1 Zatěžovací charakteristika termoelektrického generátoru při nominálním výkonu kotle a proměnných teplotách vratné vody	57
Obr. 5.2 Výkonová křivka termoelektrického generátoru při nominálním výkonu kotle a proměnných teplotách vratné vody	57
Obr. 5.3 Průběh svorkového napětí termoelektrických modulů při rozhořívání paliva v krbové vložce	59
Obr. 5.4 Průběh výkonu a účinnosti polovodičových sloupků o šířce 1,5 mm a faktoru plnění 0,3 v závislosti na jejich délce a množství polovodičových dvojic.....	61
Obr. 5.5 Průběh výkonu a účinnosti polovodičových sloupků o šířce 1,5 mm a faktoru plnění 0,3 v závislosti na jejich délce a množství polovodičových dvojic.....	63

Seznam tabulek

Tab. 1.1 Parametry vybraných kotlů nevyžadující samostatně připojení k rozvodné síti	31
Tab. 4.1 Prvkový rozbor paliv vzhledem k surovému stavu a jejich výhřevnost	41
Tab. 4.2 Vstupní parametry výpočtu pro ověření simulačního nástroje.....	48
Tab. 5.1 Změřené hodnoty při $t_{\text{spal}} = 196\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $t_{\text{voda}} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$	56
Tab. 5.2 Změřené hodnoty při $t_{\text{spal}} = 196\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $t_{\text{voda}} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$	56
Tab. 5.3 Změřené hodnoty při $t_{\text{spal}} = 196\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $t_{\text{voda}} = 38\text{ }^{\circ}\text{C}$	57
Tab. 5.4 Porovnání experimentálně změřených hodnot a hodnot získaných ze simulačního nástroje při $t_{\text{spal}} = 196\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $t_{\text{voda}} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$	58
Tab. 5.5 Parametry výpočtu termoelektrického generátoru pro zplyňovací kotel na dřevo	60
Tab. 5.6 Dosažené výsledky	61
Tab. 5.7 Parametry výpočtu termoelektrického generátoru pro krbová kamna na dřevo.....	62
Tab. 5.8 Výsledky simulací	62
Tab. 5.9 Parametry výpočtu termoelektrického generátoru pro zplyňovací kotel na hnědé uhlí	63
Tab. P1 Vybrané historické termoelektrické generátory a přehled jejich parametrů	88
Tab. P2 Parametry kamen a kotlů pro teplovodní vytápění	91
Tab. P3 Parametry nízkopříkonových mokroběžných čerpadel	104
Tab. P4 Výpočet parametrů spalin a odkouření	107

Bibliografie

- [1] ROWE, D., David ROWE, ed. *CRC Handbook of Thermoelectrics*. 1st ed. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press, 1995. 1st. ed. ISBN 978-084-9301-469.
- [2] SEEBECK, T. a A. OETTINGEN. *Magnetische Polarisation der Metalle und Erze durch Temperatur-Differenz*. Leipzig: W. Engelmann, 1895.
- [3] GOLDSMID, Julian. *Introduction to Thermoelectricity*. 1. vyd. Berlín: Springer, b.r. ISBN 978-3-642-00715-6.
- [4] MATYÁŠ, Zdeněk. *Úvod do kvantové fyziky polovodičů: celost. vysokoškolská učeb.* 1. vyd. Praha: Nakladatelství Československé akademie věd, b.r.
- [5] ROWE, , David ROWE, ed. *Thermoelectrics Handbook: Macro to Nano-Structured Materials*. 1st ed. Boca Raton, FL: Taylor & Francis, b.r. ISBN 9780849322648.
- [6] GOUPIL, Christophe. *Continuum Theory and Modeling of Thermoelectric Elements*. 1st ed. Weinheim, Germany: Wiley, 2016, 360 s. ISBN 978-3-527-41337-9.
- [7] IOFFE, A. *Semiconductor thermoelements, and thermoelectric cooling*. Rev. and supplemented for the English ed. London: Infosearch, 1957. ISBN 978-0850860399.
- [8] ZEMANOVSKY, Mark a Richard DITTMAN. *Heat and Thermodynamics*. 7th ed. London: McGraw-Hill, 1968. ISBN 978-0070170599.
- [9] ALTENKIRCH, Edmund. Über den Nutzeffekt der Thermosäulen. *Physikalische Zeitschrift*. Leipzig, 1909, **10**(16), 560-568.
- [10] SNYDER, G. a Eric TOBERER. Complex Thermoelectric Materials. *Nature Materials* [online]. England: Nature Publishing Group, 2008, **2008**(7), 105-114 [cit. 2018-04-09]. DOI: 10.1038/nmat2090. Dostupné z: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.476.323&rep=rep1&type=pdf>
- [11] HORÁK, Zdeněk. *Úvod do molekulové a atomové fyziky*. 2., rev. a dopl. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1957.
- [12] NOLAS, George, Jeffrey SHARP a Julian GOLDSMID. *Thermoelectrics: Basic Principles and New Materials Developments*. 1. vyd. Berlin: Springer, 2001. ISBN 978-3-540-41245-8.
- [13] ROWE, David, David ROWE, ed. *Modules, Systems, and Applications in Thermoelectrics: Thermoelectrics and its Energy Harvesting*. 1st ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2012. ISBN 978-143-9874-721.
- [14] HE, Jian a Terry TRITT. Advances in thermoelectric materials research: Looking back and moving forward. *Science* [online]. 2017, **357**(6358), 9 [cit. 2019-01-30]. DOI: 10.1126/science.aak9997. ISSN 0036-8075. Dostupné z: <http://www.sciencemag.org/lookup/doi/10.1126/science.aak9997>
- [15] VINING, Cronin. The Thermoelectric Process. *MRS proceedings: Symposium Q – Thermoelectric Materials - New Directions and Approaches* [online]. 1997, **478**, 3-14 [cit. 2019-06-15]. DOI: 10.1557/PROC-478-3. ISSN 0272-9172. Dostupné z: https://www.cambridge.org/core/product/identifier/S1946427400294517/type/journal_article

- [16] SHERMAN, B., R. HEIKES a R. URE. Calculation of Efficiency of Thermoelectric Devices. *Journal of Applied Physics*. 1960, **31**(1), 16. DOI: 10.1063/1.1735380. Dostupné také z: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.1735380>
- [17] GAULTOIS, Michael, Taylor SPARKS, Christopher BORG, Ram SESHADRI, William BONIFICIO a David CLARKE. Data-Driven Review of Thermoelectric Materials: Performance and Resource Considerations. *Chemistry of Materials* [online]. 2013, **25**(15), 2911-2920 [cit. 2019-07-17]. DOI: 10.1021/cm400893e. ISSN 0897-4756. Dostupné z: <http://pubs.acs.org/doi/10.1021/cm400893e>
- [18] BRÁZDIL, Marian. Možnosti využití termoelektrických jevů pro výrobu elektrické energie z odpadního tepla. *TZB-info* [online]. Praha, 2013, **4** [cit. 2018-04-09]. Dostupné z: <https://energetika.tzb-info.cz/kogenerace/10220-moznosti-vyuziti-termoelektrickych-jevu-pro-vyrobu-elektricke-energie-z-odpadniho-tepla>
- [19] YAZAWA, Kazuaki a Ali SHAKOURI. Optimization of power and efficiency of thermoelectric devices with asymmetric thermal contacts. *Journal of Applied Physics* [online]. American Institute of Physics, 2012, **111**(2), 024509 [cit. 2016-12-07]. DOI: 10.1063/1.3679544. ISSN 0021-8979. Dostupné z: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.3679544>
- [20] TELKES, Maria. The Efficiency of Thermoelectric Generators. I. *Journal of Applied Physics*. 1947, **18**(12), 1116. DOI: 10.1063/1.1697593. ISSN 00218979. Dostupné také z: <http://scitation.aip.org/content/aip/journal/jap/18/12/10.1063/1.1697593>
- [21] CALLEN, Herbert. The Application of Onsager's Reciprocal Relations to Thermoelectric, Thermomagnetic, and Galvanomagnetic Effects. *American Physical Society*. 1948, **73**(11), 1349-1358. DOI: 10.1103/PhysRev.73.1349.
- [22] DOMENICALI, Charles. Stationary Temperature Distribution in an Electrically Heated Conductor. *Journal of Applied Physics*. American Institute of Physics, 1954, **25**(10). DOI: 10.1063/1.1721551. Dostupné také z: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.1721551>
- [23] *Continuum Theory and Modeling of Thermoelectric Elements: Edited by Christophe Goupil*. První. Weinheim, Německo: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2016. ISBN 978-3-527-41337-9.
- [24] SANDOZ-ROSADO, Emil a Robert STEVENS. Experimental Characterization of Thermoelectric Modules and Comparison with Theoretical Models for Power Generation. *Journal of Electronic Materials* [online]. 2009, **38**(7), 1239-1244 [cit. 2017-05-19]. DOI: 10.1007/s11664-009-0744-0. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11664-009-0744-0>
- [25] MIN, Gao a David ROWE. Design theory of thermoelectric modules for electrical power generation. *IEE Proceedings - Science, Measurement and Technology* [online]. IET, 1996, **143**(6), 351-356 [cit. 2019-06-14]. DOI: 10.1049/ip-smt:19960714. ISSN 1350-2344. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=553234>
- [26] SANDOZ-ROSADO, Emil. *Investigation and Development of Advanced Models of Thermoelectric Generators for Power Generation Applications* [online]. Rochester, New York, 2009 [cit. 2019-07-17]. Dostupné z: <https://scholarworks.rit.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=8485&context=theses>. Diplomová práce. Department of Mechanical Engineering, Kate Gleason College of Engineering, Rochester Institute of Technology. Vedoucí práce Robert Stevens.

- [27] CHEN, Jincan, Zijun YAN a Liqing WU. The influence of Thomson effect on the maximum power output and maximum efficiency of a thermoelectric generator. *Journal of Applied Physics* [online]. 1996, **79**(11), 8823-8828 [cit. 2019-07-17]. DOI: 10.1063/1.362507. ISSN 0021-8979. Dostupné z: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.362507>
- [28] FREUNEK, Michael, Monika MÜLLER, Tolgay UNGAN, William WALKER a Leonhard REINDL. New Physical Model for Thermoelectric Generators. *Journal of Electronic Materials* [online]. 2009, **38**(7), 1214-1220 [cit. 2019-07-17]. DOI: 10.1007/s11664-009-0665-y. ISSN 0361-5235. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11664-009-0665-y>
- [29] LAIRD TECHNOLOGIES, . *Thin Film Thermoelectric: Handbook*. 1. 2012, 20 s. Dostupné také z: http://www.mouser.com/pdfDocs/Laird_ThinFilmThermoelectricHandbook.pdf. 2019-01-26.
- [30] TERMO-GEN, . *Thermoelectric modules price list*. 2008, 1 s. Dostupné také z: http://termo-gen.com/pdf/Pricelist_TEP_modules.pdf
- [31] CIDETE, . Thermoelectric Power Modules. *Cidete* [online]. 2019 [cit. 2019-01-14]. Dostupné z: <http://www.cidete.com/index.php/2012-02-21-13-18-49>
- [32] CUSTOM THERMOELECTRIC, . TEG Modules. *Custom Thermoelectric / Thermoelectric Cooling / Peltier Coolers / TEG Water Blocks TEC* [online]. Bishopville, 2019 [cit. 2019-01-22]. Dostupné z: <https://customthermoelectric.com/products/thermoelectric-power-generators/tegs.html>
- [33] TELLUREX, . Thermoelectric power generators. *Thermoelectric power generators Tellurex* [online]. Traverse City, Michigan, USA, 2016 [cit. 2018-12-13]. Dostupné z: <http://tellurex.com/products/thermoelectric-power-generator/>
- [34] HI-Z TECHNOLOGY, . Power Generating Thermoelectric Modules. *Products - Hi-Z Technology* [online]. ©2006-2019 [cit. 2019-01-28]. Dostupné z: <https://hi-z.com/products/>
- [35] TECTEG, . High Efficiency TEG Modules: PbTe/TAGS. *Thermoelectric-generator teg modules* [online]. Aurora, Ontario, 2018 [cit. 2019-01-21]. Dostupné z: <https://thermoelectric-generator.com/pbtag-400c-600c-high-efficiency-up-to-12-teg-modules/>
- [36] THERMALFORCE, . Thermogeneratoren. *Thermogeneratoren, Kuehlkoerper, Pumpen, Anschuesse, Heatpipes, Warmeleitmittel* [online]. Berlin, b.r. [cit. 2019-01-09]. Dostupné z: <http://thermalforce.de/de/product/thermogenerator/index.php?uid=66c8973eb485ed8997306ae241dd9130&ref=>
- [37] EUROPEAN THERMODYNAMICS, . Products. *European Thermodynamics / Intelligent Thermal Management* [online]. Leicester, UK, 2019 [cit. 2019-01-29]. Dostupné z: <https://www.europanthermodynamics.com/products/thermoelectric-modules/seebeck-generator>
- [38] KRYOTHERM, . Low Temperature Generating Modules. *Thermoelectric, Peltier cooler* [online]. Saint-Petersburg, 2018 [cit. 2019-01-23]. Dostupné z: <http://kryothermtec.com/low-temperature-generating-modules.html>
- [39] KRYOTHERM, . Medium Temperature Generating Modules Mars Series. *Thermoelectric, Peltier cooler* [online]. Saint-Petersburg, 2018 [cit. 2019-01-25]. Dostupné z: <http://kryothermtec.com/medium-temperature-generating-modules-mars-series.html>
- [40] TEGMART, . Tegpro Thermoelectric Generator Products. *TEGPRO Thermoelectric Generators and Thermoelectric Generator Modules* [online]. 2013 [cit. 2019-01-14]. Dostupné z: <http://www.tegpro.com/thermoelectric-generator-products>

- [41] HODES, Marc. On One-Dimensional Analysis of Thermoelectric Modules (TEMs). *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies* [online]. 2005, **28**(2), 218-229 [cit. 2018-04-06]. DOI: 10.1109/TCAPT.2005.848532. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1432929/>
- [42] II-VI MARLOW, . IV. Thermoelectric Cooling System Installations. *Thermoelectric Cooling Technologies / II-VI Marlow* [online]. 2019 [cit. 2019-06-25]. Dostupné z: <https://www.marlow.com/resources/thermoelectric-technology-guide/iv-system-installations>
- [43] CUSTOM THERMOELECTRIC, . TEG Installation. *Custom Thermoelectric / Thermoelectric Cooling / Peltier Coolers / TEG Water Blocks TEC* [online]. 2019 [cit. 2019-06-25]. Dostupné z: <https://customthermoelectric.com/tech-info/install/teg-installation.html>
- [44] FERROTEC, . Thermoelectric Technical Reference. *Ferrotec Peltier Thermoelectric Cooler Modules and Thermal Solutions* [online]. © 2001-2019 [cit. 2017-10-25]. Dostupné z: <https://thermal.ferrotec.com/technology/thermoelectric-reference-guide/thermalref10/>
- [45] PEM-2: Power Generation Efficiency Characteristics Evaluation System [online]. In: . b.r. [cit. 2018-04-13]. Dostupné z: <http://www.ulvac.com/userfiles/files/Components/Thermal-Analysis-and-Coating/Thermoelectric-Testers/PEM-2.pdf>
- [46] PANCO, . TEGeta: Measurement of thermal and electrical properties and efficiency of Thermoelectric Power Generators TEG. In: *PANCO - Physikalische Technik, Anlagenbau und Consulting* [online]. Muelheim-Kaerlich, b.r. [cit. 2018-04-13]. Dostupné z: http://www.panco.de/downloads/TEGeta_Flyer.pdf
- [47] MITRANI, D., J.A. TOME, J. SALAZAR, A. TURO, M.J. GARCIA a J.A. CHAVEZ. *Dynamic measurement system of thermoelectric module parameters* [online]. La Grande Motte, France: IEEE, 2003, , 524-527 [cit. 2018-04-12]. DOI: 10.1109/ICT.2003.1287564. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1287564/>
- [48] RAUSCHER, L., S. FUJIMOTO, H. KAIBE a S. SANO. Efficiency determination and general characterization of thermoelectric generators using an absolute measurement of the heat flow. *Measurement Science and Technology* [online]. Institute of Physics Publishing, 2005, **16**(2005), 1054–1060 [cit. 2018-04-12]. DOI: 10.1088/0957-0233/16/5/002. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0957-0233/16/5/002/pdf>
- [49] ANATYCHUK, Lukyan a M.V. HAVRYLYUK. Procedure and Equipment for Measuring Parameters of Thermoelectric Generator Modules. *Journal of Electronic Materials* [online]. 2011, **40**(5), 1292–1297 [cit. 2018-04-12]. DOI: 10.1007/s11664-011-1619-8. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11664-011-1619-8>
- [50] FARAJI, Amir a Aliakbar AKBARZADEH. Design of a Compact, Portable Test System for Thermoelectric Power Generator Modules. *Journal of Electronic Materials* [online]. b.r., **42**(7), 1535–1541 [cit. 2018-04-12]. DOI: 10.1007/s11664-012-2314-0. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11664-012-2314-0>
- [51] MONTECUCCO, Andrea, James BUCKLE, Jonathan SIVITER a Andrew KNOX. A New Test Rig for Accurate Nonparametric Measurement and Characterization of Thermoelectric Generators. *Journal of Electronic Materials* [online]. 2013, **42**(7), 1966–1973 [cit. 2018-04-12]. DOI: 10.1007/s11664-013-2484-4. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11664-013-2484-4>
- [52] KOLODNER, Paul. High-precision thermal and electrical characterization of thermoelectric modules. *Review of Scientific Instruments* [online]. American Institute of Physics, 2014, **85**(5),

- 054901-054911 [cit. 2018-04-12]. DOI: 10.1063/1.4872276. Dostupné z: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.4872276>
- [53] HEJTMÁNEK, J., K. KNÍŽEK, V. ŠVEJDA, P. HORNA a M. SIKORA. Test System for Thermoelectric Modules and Materials. *Journal of Electronic Materials* [online]. 2014, **43**(10), 3726-3732 [cit. 2017-05-17]. DOI: 10.1007/s11664-014-3084-7. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11664-014-3084-7>
- [54] LUKOWICZ, Marian, Elisabeth ABBE, Tino SCHMIEL a Martin TAJMAR. Thermoelectric Generators on Satellites—An Approach for Waste Heat Recovery in Space. *Energies* [online]. 2016, **9**(7), 541 [cit. 2018-04-12]. DOI: 10.3390/en9070541. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1996-1073/9/7/541>
- [55] HARMAN, T. Special Techniques for Measurement of Thermoelectric Properties. *Journal of Applied Physics*. 1958, **29**(9), 1373-1374. DOI: 10.1063/1.1723445. Dostupné také z: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.1723445>
- [56] HARMAN, T., J. CAHN a M. LOGAN. Measurement of Thermal Conductivity by Utilization of the Peltier Effect. *Journal of Applied Physics*. 1959, **30**(9), 1351-1359. DOI: 10.1063/1.1735334. Dostupné také z: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.1735334>
- [57] ***BUIST, Richard, Richard BUIST, ed. Characterization of TE Materials and Devices. In: *SCT-93: Short course on thermoelectrics*. 1993. Yokohama: The International Thermoelectric Society, 1993, 22 s.
- [58] MIN, Gao a David ROWE. A novel principle allowing rapid and accurate measurement of a dimensionless thermoelectric figure of merit. *Measurement Science and Technology* [online]. 2001, **12**(8), 1261-1262 [cit. 2018-04-11]. DOI: 10.1088/0957-0233/12/8/337. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0957-0233/12/8/337/pdf>
- [59] MIN, Gao. ZT Measurements Under Large Temperature Differences. *Journal of Electronic Materials* [online]. 2010, **39**(10), 1782-1785 [cit. 2018-04-11]. DOI: 10.1007/s11664-010-1136-1. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11664-010-1136-1>
- [60] RITZER, Todd, Paul LAU a Andy BOGARD. A critical evaluation of today's thermoelectric modules [online]. Dresden, Germany: IEEE, 1997, , 619-623 [cit. 2018-04-11]. DOI: 10.1109/ICT.1997.667606. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/667606/>
- [61] HORI, Y., D. KUSANO, T. ITO a K. IZUMI. Analysis on thermo-mechanical stress of thermoelectric module [online]. Baltimore, MD, USA: IEEE, 1999 [cit. 2018-04-11]. DOI: 10.1109/ICT.1999.843396. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/843396/>
- [62] HATZIKRANIOTIS, E., K. ZORBAS, I. SAMARAS, Th. KYRATSI a K. PARASKEVOPOULOS. Efficiency Study of a Commercial Thermoelectric Power Generator (TEG) Under Thermal Cycling. *Journal of Electronic Materials* [online]. 2010, **39**(9), 2112-2116 [cit. 2017-05-25]. DOI: 10.1007/s11664-009-0988-8. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11664-009-0988-8>
- [63] BARAKO, Michael, Woosung PARK, Amy MARCONNET, Mehdi ASHEGHI a Kenneth GOODSON. Thermal cycling, Mechanical Degradation, and the Effective Figure of Merit of a Thermoelectric Module. *Journal of Electronic Materials* [online]. 2013, **42**(3), 372-381 [cit. 2017-05-29]. DOI: 10.1007/s11664-012-2366-1. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11664-012-2366-1>
- [64] BARAKO, Michael, Woosung PARK, Amy MARCONNET, Mehdi ASHEGHI a Kenneth GOODSON. A Reliability Study with Infrared Imaging of Thermoelectric Modules under

- Thermal Cycling* [online]. San Diego, CA, USA, 2012, , 86-92 [cit. 2017-05-26]. DOI: 10.1109/ITHERM.2012.6231417. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6231417/>
- [65] WOOSUNG PARK, , Michael BARAKO, Amy MARCONNET, Mehdi ASHEGHI a Kenneth GOODSON. *Effect of thermal cycling on commercial thermoelectric modules* [online]. b.r., , 107-112 [cit. 2017-05-29]. DOI: 10.1109/ITHERM.2012.6231420. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6231420/>
- [66] OCHI, T., G. NIE, S. SUZUKI, M. KIKUCHI, S. ITO a J. GUO. Power-Generation Performance and Durability of a Skutterudite Thermoelectric Generator. *Journal of Electronic Materials* [online]. 2014, **43**(6), 2344-2347 [cit. 2017-05-25]. DOI: 10.1007/s11664-014-3060-2. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11664-014-3060-2>
- [67] WANG, Hsin, Robin MCCARTY, James SALVADOR, Atsushi YAMAMOTO a Jan KÖNIG. Determination of Thermoelectric Module Efficiency: A Survey. *Journal of Electronic Materials* [online]. 2014, **43**(6), 2274-2286 [cit. 2017-05-14]. DOI: 10.1007/s11664-014-3044-2. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11664-014-3044-2>
- [68] MAHAJAN, Satchit. *A Test setup for characterizing high-temperature thermoelectric modules*. Rochester, USA, 2013. Diplomová práce. Rochester Institute of Technology. Vedoucí práce Robert Stevens.
- [69] D'ANGELO, Jonathan, Eldon CASE, Nuraddin MATCHANOV et al. Electrical, Thermal, and Mechanical Characterization of Novel Segmented-Leg Thermoelectric Modules. *Journal of Electronic Materials* [online]. 2011, **40**(10), 2051-2062 [cit. 2018-04-12]. DOI: 10.1007/s11664-011-1717-7. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11664-011-1717-7>
- [70] MIN, Gao a David ROWE. "Symbiotic" application of thermoelectric conversion for fluid preheating/power generation. *Energy Conversion and Management*. 2002, **43**(2), 221-228. DOI: 10.1016/S0196-8904(01)00024-3. ISSN 01968904. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0196890401000243>
- [71] PETERS, Franz. *Thermoelemente und thermosäulen: Ihre Herstellung und Anwendung*. Halle (Saale), Německo: Knapp, 1908.
- [72] URBANITZKY, Alfred, Richard WORMELL a Robert WALMSLEY. *Electricity in the service of man*. 1. vyd. London: Cassel, 1886.
- [73] CLAMOND, Charles. On a New Thermo-Electric Pile. *Journal of the Society of Telegraph Engineers*. 1875, **4**(11), 253-257. DOI: 10.1049/jste-1.1875.0018. Dostupné také z: <http://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/jste-1.1875.0018>
- [74] BEACH, Alfred. *The Science Record for 1875: A Compendium of Scientific Progress and Discovery During the Past Year*. New York: Munn and Company, 1875.
- [75] CARLTON, Richard. Thermoelectric Generators for Mobile Communication Systems. *IEEE Transactions on Vehicular Communications*. 1966, **15**(1), 49-54. DOI: 10.1109/TVC.1966.33025. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1621835/>
- [76] VEDERNIKOV, M.V. a E.K. IORDANISHVILI. A.F. *Ioffe and Origin of Modern Semiconductor Thermoelectric Energy Conversion* [online]. Nagoya, Japan: IEEE, 1998, , 37-42 [cit. 2018-04-06]. DOI: 10.1109/ICT.1998.740313. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/740313/>
- [77] SCHUH, N. a R. TALLENT. Solar-Powered Thermoelectric Generator Design Considerations. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Part II: Applications and*

- Industry*. 1959, **78**(5), 345-352. DOI: 10.1109/TAI.1959.6369062. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6369062/>
- [78] BATEMAN, P.J. ROYAL AIRCRAFT ESTABLISHMENT. *Some Notes on the Possible Application of Thermoelectric Devices to Guided Missile Fuzing Projects: Technical note No: ARM.634*. Farnborough, Hampshire, England, 1959. Dostupné také z: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/312084.pdf>
- [79] BENNETT, Garry a Emanuel SKRABEK. *Power Performance of US Space Radioisotope Thermoelectric Generators* [online]. Pasadena, California, USA: IEEE, 1996, , 357-372 [cit. 2018-04-06]. DOI: 10.1109/ICT.1996.553506. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/553506/>
- [80] NEILD, A. Portable Thermoelectric Generators. In: *SAE Mobilus* [online]. New York, USA: Society of Automotive Engineers International, 1963, 10 s. [cit. 2019-01-24]. DOI: 10.4271/630019. ISSN 0148-7191.
- [81] CRANE, D. *TEG on-vehicle performance & model validation: Directions in engine-efficiency and emissions research (DEER) conference 2012: October 16 – 19, 2012* [online]. Dearborn, USA, 2012 [cit. 2019-07-06]. Dostupné z: http://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/pdfs/deer_2012/thursday/presentations/deer12_lagrandeur.pdf
- [82] CRANE, Doug, John LAGRANDEUR, Vladimir JOVOVIC et al. TEG On-Vehicle Performance and Model Validation and What It Means for Further TEG Development. *Journal of Electronic Materials* [online]. 2013, **42**(7), 1582–1591 [cit. 2018-04-07]. DOI: 10.1007/s11664-012-2327-8. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11664-012-2327-8>
- [83] FAIRBANKS, John. Thermoelectric Applications in Vehicles Status 2008. In: *6th European conference on thermoelectrics : July 2 - 4, 2008, Paris, France* [online]. b.r., 7 s. [cit. 2018-04-07].
- [84] HENDRICKS, Terry a Jason LUSTBADER. *Advanced Thermoelectric Power System Investigations for Light-Duty and Heavy Duty Applications: Part I* [online]. Long Beach, CA, USA: IEEE, 2002, , 381-386 [cit. 2018-04-07]. DOI: 10.1109/ICT.2002.1190343. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1190343/>
- [85] HENDRICKS, Terry a Jason LUSTBADER. *Advanced Thermoelectric Power System Investigations for Light-Duty and Heavy Duty Applications: Part II* [online]. Long Beach, CA, USA: IEEE, 2002, , 387-394 [cit. 2018-04-07]. DOI: 10.1109/ICT.2002.1190344. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1190344/>
- [86] KLUZOVÁ, Ivana. *Měření a vyhodnocování výkonových parametrů termoelektrického generátoru malého výkonu*. Brno, 2016. Dostupné také z: <https://dspace.vutbr.cz/handle/11012/60552>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Marian Brázdil.
- [87] QIU, Kuangrong a A.C.S. HAYDEN. A Natural-Gas-Fired Thermoelectric Power Generation System. *Journal of Electronic Materials* [online]. 2009, **38**(7), 1315-1319 [cit. 2019-07-17]. DOI: 10.1007/s11664-008-0648-4. ISSN 0361-5235. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11664-008-0648-4>
- [88] MOSER, Wilhelm. *Micro-Scale CHP based on Biomass: Intelligent Heat Transfer with Thermoelectric Generators* [online]. Jyväskylä, Finsko, 2007 [cit. 2019-07-15]. Dostupné z:

- [https://www.bioenergy2020.eu/files/publications/pdf/Austrian_Bioenergy_Moser_\(September_5th,_Combined_Heat_and_Power\).pdf](https://www.bioenergy2020.eu/files/publications/pdf/Austrian_Bioenergy_Moser_(September_5th,_Combined_Heat_and_Power).pdf)
- [89] MIN, Gao a David ROWE. Optimisation of thermoelectric module geometry for 'waste heat' electric power generation. *Journal of Power Sources* [online]. Elsevier, 1992, **38**(3), 253-259 [cit. 2019-06-29]. DOI: 10.1016/0378-7753(92)80114-Q. ISSN 03787753. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/037877539280114Q>
 - [90] HENDRICKS, Terry. Integrated Thermoelectric–Thermal System Resistance Optimization to Maximize Power Output in Thermoelectric Energy Recovery Systems. *MRS Proceedings: Symposium BB – Thermoelectric Materials—From Basic Science to Applications* [online]. 2014, (1642), 13-1642-02-0418 [cit. 2016-06-03]. DOI: 10.1557/opl.2014.443. Dostupné z: http://journals.cambridge.org/article_S1946427414004436
 - [91] YEE, Shannon, Saniya LEBLANC, Kenneth GOODSON a Chris DAMES. \$ per W metrics for thermoelectric power generation: beyond ZT. *Energy & Environmental Science* [online]. 2013, **6**(9), 2561-2571 [cit. 2019-06-13]. DOI: 10.1039/C3EE41504J. ISSN 1754-5692. Dostupné z: <http://xlink.rsc.org/?DOI=C3EE41504J>
 - [92] HENDRICKS, Terry. Thermal System Interactions in Optimizing Advanced Thermoelectric Energy Recovery Systems. *Journal of Energy Resources Technology* [online]. 2007, **129**(3), 223-231 [cit. 2019-07-15]. DOI: 10.1115/1.2751504. ISSN 01950738. Dostupné z: <http://EnergyResources.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1414713>
 - [93] HENDRICKS, Terry a William CHOATE. PACIFIC NORTHWEST NATIONAL LAB. (PNNL), RICHLAND, WA (UNITED STATES). *Engineering Scoping Study of Thermoelectric Generator Systems for Industrial Waste Heat Recovery*. U.S. Department of Energy, 2006. DOI:10.2172/1218711. Dostupné také z: https://www1.eere.energy.gov/manufacturing/industries_technologies/imf/pdfs/teg_final_report_13.pdf
 - [94] CLINGMAN, W. New Concepts in Thermoelectric Device Design. *Proceedings of the IRE* [online]. 1961, **49**(7), 1155-1160 [cit. 2019-06-11]. DOI: 10.1109/JRPROC.1961.287859. ISSN 0096-8390. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4066469/>
 - [95] APERTET, Yann, Henri OUERDANE, Christophe GOUPIL a Philippe LECOEUR. Influence of Thermal Environment on Optimal Working Conditions of Thermoelectric Generators. *Journal of Applied Physics* [online]. 2014, **116**(14) [cit. 2019-06-14]. DOI: 10.1063/1.4897350. ISSN 0021-8979. Dostupné z: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.4897350>
 - [96] HEIKES, Robert a Roland URE. *Termoelectricity: science and engineering*. New York: Interscience Publishers, 1961.
 - [97] YAZAWA, Kazuaki a Ali SHAKOURI. Cost-Efficiency Trade-off and the Design of Thermoelectric Power Generators. *Environmental Science & Technology* [online]. American Chemical Society, 2011, **45**(17), 7548-7553 [cit. 2019-06-17]. DOI: 10.1021/es2005418. ISSN 0013-936X. Dostupné z: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es2005418>
 - [98] APERTET, Yann, Henri OUERDANE, Christophe GOUPIL a Philippe LECOEUR. Internal convection in thermoelectric generator models. In: *Journal of Physics: Conference Series* [online]. 2012, **395** [cit. 2019-07-16]. DOI: 10.1088/1742-6596/395/1/012103. ISSN 1742-6588. Dostupné z: <http://stacks.iop.org/1742-6596/395/i=1/a=012103?key=crossref.1da33288acca13129bdfac8c898671c6>

- [99] YAZAWA, Kazuaki a Ali SHAKOURI. *Optimization of power and efficiency of thermoelectric devices with asymmetric thermal contacts* [online]. b.r. [cit. 2016-12-07]. DOI: 10.1063/1.3679544. Dostupné z: <http://scitation.aip.org/content/aip/journal/jap/111/2/10.1063/1.3679544>
- [100] *Evropa 2020* [online]. b.r. [cit. 2019-07-14]. Dostupné z: <https://www.vlada.cz/cz/evropske-zalezitosti/evropske-politiky/strategie-evropa-2020/strategie-evropa-2020-78695/>
- [101] AGROMECHANIKA, . Kotle na tuhá paliva. *Agromechanika* [online]. 2015 [cit. 2018-02-02]. Dostupné z: <https://www.agromechanika.cz/>
- [102] ATMOS, . Zplynovací kotle na dřevo. *Kotle ATMOS* [online]. b.r. [cit. 2018-02-06]. Dostupné z: <https://www.atmos.eu>
- [103] ATTACK, . Kotle na pelety. *Kotle ATTACK* [online]. 2018 [cit. 2018-02-06]. Dostupné z: <http://www.attack.sk/kotly-na-pelety/>
- [104] BENEKOTERM, . Automatické kotle. *Kvalitní automatické kotle Benekov* [online]. 2018 [cit. 2018-02-21]. Dostupné z: <http://www.benekov.com/produkty>
- [105] CENTROMETAL, . Products. *Centrometal / Heating Technique* [online]. ©2009-2013 [cit. 2018-02-22]. Dostupné z: <https://www.centrometal.hr>
- [106] DAKON, . Výrobky: kotle na tuhá paliva. *Kotle na tuhá paliva, automatické kotle a elektrokotle / Dakon* [online]. 2017 [cit. 2018-02-07]. Dostupné z: <http://www.dakon.cz/vyrobky/>
- [107] DEFRO, . Boilers with Feeder Biomass. *DEFRO - technika grzewcza, kotły c.o., piece, betoniarki* [online]. b.r. [cit. 2018-02-06]. Dostupné z: <http://www.en.defro.pl/k,20,boilers-with-feeder-biomass.html>
- [108] EASYPELL, . Product characteristics. *Wood Pellet Boilers / Easypell Pellet Boilers* [online]. 2018 [cit. 2018-02-15]. Dostupné z: <http://www.easypell.com/product/product-characteristics.html>
- [109] EDILKAMIN, . Produkty- kamna na pelety. *Edilkamin - Vedoucí společnost ve výrobě teplovodních a teplovzdušných kamen, krbů a krbových vložek na pelety i na dřevo, kotlů, krbových obestaveb a kombinovaných kamen na dřevo a pelety* [online]. b.r. [cit. 2018-02-26]. Dostupné z: <http://edilkamin.com/cs/kamna-na-pelety>
- [110] ENVO GROUP, . Kocioł na pelet – KSP Spark. *Producent kotłów, piece co, kotły grzewcze - PEREKO* [online]. 2013 [cit. 2018-02-13]. Dostupné z: <https://www.pereko.pl/seria-ksp-spark.html>
- [111] EKO GALVA, . Automatické kotle na uhlí a pelety EkoScroll. *Automatické kotle na uhlí EkoScroll* [online]. 2018 [cit. 2018-02-16]. Dostupné z: <https://www.ekoscroll.cz/produkty>
- [112] ELEKTROMET, . Kotły peletowe. *Elektromet - technika grzewcza* [online]. ©2012-2018 [cit. 2018-02-07]. Dostupné z: <https://elektromet.pl/pl/technika-grzewcza/oferta/45/kotly-peletowe>
- [113] ETA HEIZTECHNIK, . Produkte. *ETA Heating Technology* [online]. 2018 [cit. 2018-02-12]. Dostupné z: <https://www.eta.co.at/>
- [114] FRÖLING, . Kotel na pelety. *Fröling - Kotle na dřevo, pelety, štěpku* [online]. b.r. [cit. 2018-02-19]. Dostupné z: <http://www.froling.cz/products/kotel-na-pelety-pe1-pellet/>
- [115] GALMET, . Kotły c.o. z podajnikiem - 5 klasa. *Technika grzewcza - kotły C.O - Hybrydowe Systemy Ogrzewania - kolektory, pompy ciepła i wymienniki ciepła - Galmet* [online]. b.r. [cit. 2018-02-19]. Dostupné z: <https://galmet.com.pl/pl/podkategoria/kotly-co-5-klasa>
- [116] ESEL, . Produkty Guntamatic. *Esel* [online]. 2008 [cit. 2018-02-28]. Dostupné z: <http://guntamatic.esel.cz/w/6074/produkty-guntamatic>

- [117] B ENERGY, . Prodej kotlů Hargassner. *B ENERGY* [online]. 2018 [cit. 2018-02-13]. Dostupné z: <http://www.benergy.cz/kotle-hargassner>
- [118] KALOR, . Pellet stoves. *Kalor Stoves / Stove, Thermo stove and biomass boiler* [online]. b.r. [cit. 2018-02-22]. Dostupné z: <http://www.kalorstufe.com/en/kalor-stoves/>
- [119] KOLTON, . Produkty. *Producent kotlů c.o. oraz pieców z podajnikiem na ekogroszek i pellet | Kolton* [online]. 2018 [cit. 2018-02-15]. Dostupné z: <http://www.kolton.pl/produkty-piece-kotly-co>
- [120] KOVARSON, . Dokumenty. *Kovarson.cz - výrobce kotlů, kotle* [online]. b.r. [cit. 2018-02-15]. Dostupné z: <https://www.kovarson.cz/cs/dokumenty/prospekty>
- [121] OPOP, . Produkty. *OPOP* [online]. 2017 [cit. 2018-02-23]. Dostupné z: <https://www.opop.cz/produkty>
- [122] PETROJET TRADE, . Kotle a hořáky na pelety. *Kotel na pelety - Levné topení MultiBio - automatické kotle na pelety* [online]. 2016 [cit. 2018-02-19]. Dostupné z: <http://www.horakypetrojet.cz/kotle-a-horaky-na-pelety>
- [123] PONAST, . Automatické kotle. *Kotle na pelety PONAST* [online]. 2018 [cit. 2018-02-06]. Dostupné z: <http://www.ponast.cz/produkt/automaticke-kotle>
- [124] ROJEK, . Kotle. *Rojek* [online]. ©2006-2016 [cit. 2018-02-10]. Dostupné z: <http://www.rojek.cz>
- [125] ZMK SAS, . Kotly C.O. - Klasa 5. *SAS - Ekologiczne Kotly C.O.* [online]. b.r. [cit. 2018-02-09]. Dostupné z: <http://www.sas.busko.pl/pl/produkty/kotly-klasy-5.html>
- [126] SLOKOV KOVO, . Produkty. *Slovak.cz* [online]. 2013 [cit. 2018-02-13]. Dostupné z: <https://www.slovak.cz/produkty>
- [127] TOPMAX, . Automatické kotle na tuhá paliva s kotlíkovou dotací. *Moderní automatické kotle 5. emisní třídy s kotlíkovou dotací | Topmax* [online]. 2018 [cit. 2018-02-12]. Dostupné z: <http://www.topmax.eu/produkty/kotle/automaticke-kotle-s-dotaci/>
- [128] VERNER SK, . Produkty. *Kotle na pelety a tuhá paliva, kotle na dřevo a krbová kamna s výměníkem; kotle Verner* [online]. 2018 [cit. 2018-02-19]. Dostupné z: <http://www.kotle-verner.cz/produkty>
- [129] VIADRUS, . Kotle na tuhá paliva. *Viadrus - kotle pro domácnosti a průmysl* [online]. 2013 [cit. 2018-02-19]. Dostupné z: <https://www.viadrus.cz/kotle-na-tuha-paliva-25.html>
- [130] VIADRUS, . Plynové kotle. *Viadrus - kotle pro domácnosti a průmysl* [online]. 2013 [cit. 2018-02-19]. Dostupné z: <https://www.viadrus.cz/plynove-kotle-26.html>
- [131] VIESMANN, . Produktový program. *Topné, průmyslové a chladicí systémy | Viessmann Česká republika* [online]. 2018 [cit. 2018-02-12]. Dostupné z: <https://www.viessmann.cz/cs/obory/topne-systemy.html>
- [132] WINDHAGER ZENTRALHEIZUNG, . Products. *Pellet heating systems / Windhager Central Heating* [online]. 2018 [cit. 2018-02-02]. Dostupné z: https://www.windhager.com/int_en/products/
- [133] ZKDESIGN, . Produkty. *Vollcano* [online]. 2018 [cit. 2018-02-03]. Dostupné z: <http://www.vollcano.cz/produkty/kotle/>
- [134] HERCULES U32: Návod k obsluze a instalaci. In: *Viadrus: Teplo pro váš domov od roku 1888* [online]. Bohumín, ČR, 2019 [cit. 2019-07-19]. Dostupné z: https://www.viadrus.cz/doc/cms_library/cz_hercules_u32_navod_k_obsluze_a_instalaci_2019_01-1743.PDF

- [135] Viadrus U22 Economy: Litinový zplyňovací kotel na palivové dřevo. In: *Viadrus: Teplo pro váš domov od roku 1888* [online]. Bohumín, 2019 [cit. 2019-07-22]. Dostupné z: https://www.viadrus.cz/doc/cms_library/viadrusu22economy-cz_final-1779.pdf
- [136] Technický list výrobku: Krbová kamna Typ: 064, POLAR 10 Aqua TV výměník 6kW. In: *ABX* [online]. Rumburk, b.r. [cit. 2019-07-22]. Dostupné z: <http://www.abx.cz/files/306/polar-10-aqua-tv-vymenik-6kw-cs.pdf>
- [137] TEPLOVODNÍ KRBOVÁ VLOŽKA WHV 105AQUATICdle EN 13229. In: *BEF Home: s žárem v srdci* [online]. Kotvrdovice, b.r. [cit. 2019-07-22]. Dostupné z: http://www.krby-bef.cz/download/tl-aquatic-wh-v-105-1302_cz.pdf
- [138] Nařízení Komise (EU) 2015/1189 ze dne 28. dubna 2015, kterým se provádí směrnice Evropského parlamentu a Rady 2009/125/ES, pokud jde o požadavky na ekodesign kotlů na tuhá paliva (Text s významem pro EHP). In: *OJ L 193*. Evropská komise EU, 2015. Dostupné také z: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_.2015.193.01.0100.01.CES
- [139] BRÁZDIL, Marian. Možnosti využití termoelektrických jevů pro výrobu elektrické energie z odpadního tepla. *TZB-info* [online]. 2019 [cit. 2018-01-05]. Dostupné z: <http://energetika.tzb-info.cz/kogenerace/10220-moznosti-vyuziti-termoelektrickych-jevu-pro-vyrobu-elektricke-energie-z-odpadniho-tepla>
- [140] *New technology for CO2 reduction: Half-Heusler waste heat conversion reduces CO2 emissions of cars: Press Information* [online]. Dillenburg, Německo: Isabellenhütte, 2018 [cit. 2019-07-04]. Dostupné z: https://www.wassenberg-pr.de/wp-content/uploads/2018/06/PM_Isabellenh%C3%BCtte_Thermoelectric-waste-heat-conversion_180618.pdf
- [141] VINING, Cronin. An inconvenient truth about thermoelectrics. *Nature Materials* [online]. 2009, 8(2), 83-85 [cit. 2019-06-25]. DOI: 10.1038/nmat2361. ISSN 1476-1122. Dostupné z: <http://www.nature.com/articles/nmat2361>
- [142] LULKOVÍČOVÁ, Otília. *Zdroje tepla a domovní kotelny*. První. Bratislava: Jaga, 2004. ISBN 80-807-6002-0.
- [143] SODOMKA, Waltr a Veronika BUKOVÁ. Dehtování komínů při provozu nízkoemisních kotlů na tuhá paliva. *TZB-info: Nejnavštěvovanější odborný portál pro stavebnictví a technická zařízení budov* [online]. Praha, 2017 [cit. 2019-07-04]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/kominy-a-kourovody/15782-dehtovani-kominu-pri-provozu-nizkoemisnich-kotlu-na-tuha-paliva>
- [144] LYČKA, Zdeněk. Kondenzační uhelné kotle – nechtěné dítě ekodesignu. *TZB-info: Nejnavštěvovanější odborný portál pro stavebnictví a technická zařízení budov* [online]. Praha, 2017 [cit. 2019-07-04]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/kotle-kamna-krby/15756-kondenzacni-uhelne-kotle-nechtene-dite-ekodesignu>
- [145] LYČKA, Zdeněk. *Malé teplovodní kotle na pevná paliva: spalování pevných paliv po roce 2013*. 1. vyd. Krnov: LING Vydavatelství, 2012. ISBN 978-80-904914-2-7.
- [146] KM2 MPPT Converters: KM2 series of MPPT Converters. *Thermoelectric Conversion Systems* [online]. Glasgow, Velká Británie, b.r. [cit. 2019-07-18]. Dostupné z: <http://www.teconversion.com/tcs/power-converters/km2/>
- [147] DLOUHÝ, Tomáš. *Výpočty kotlů a spalinových výměníků*. Vyd. 3. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 1999. ISBN 978-80-01-03757-7.

- [148] TNO, . Phyllis2: wood, pine (#114). *Phyllis2: database for biomass and waste* [online]. Nizozemí, 2019 [cit. 2019-07-08]. Dostupné z: <https://phyllis.nl/Biomass/View/114>
- [149] TNO, . Phyllis2: wood, beech (#1709). *Phyllis2: database for biomass and waste* [online]. Nizozemí, 2019 [cit. 2019-07-08]. Dostupné z: <https://phyllis.nl/Biomass/View/114>
- [150] IBLER, Zdeněk. *Technický průvodce energetika: 1. díl*. 1. vydání. Praha: BEN - technická literatura, 2002. ISBN 80-730-0026-1.
- [151] LYČKA, Zdeněk. *Dřevní peleta II: spalování v malých zdrojích tepla*. 1. vyd. Krnov: LING Vydavatelství, 2011, 71 s. ISBN 978-80-904914-1-0.
- [152] *Hydraulický výpočet samostatního komína: obecné zásady* [online]. Praha: Katedra technických zařízení budov, Fakulta stavební, České vysoké učení technické v Praze, 2010, , 32 [cit. 2019-07-07]. Dostupné z: <http://tzb.fsv.cvut.cz/files/vyuka/125ykot/prednasky/125ykot-10.pdf>
- [153] ČERNÝ, Václav, Břetislav JANEBA a Jiří TEYSSLER. *Parní kotle: vysokošk. učebnice pro strojní fakulty*. Praha: SNTL, 1983. Technický průvodce (SNTL-Nakladatelství technické literatury).
- [154] HUIJBREGTS, W.M.M. a R.G.I. LEFERINK. Latest advances in the understanding of acid dewpoint corrosion: corrosion and stress corrosion cracking in combustion gas condensates. *Anti-Corrosion Methods and Materials* [online]. 2004, **51**(3), 173-188 [cit. 2016-11-16]. DOI: 10.1108/00035590410533129. ISSN 0003-5599. Dostupné z: <https://www.emeraldinsight.com/doi/10.1108/00035590410533129>
- [155] BAŠTA, Jiří a Karel KABELE. *Otopné soustavy teplovodní*. 3., přeprac. vyd. Praha: Společnost pro techniku prostředí, odborná sekce vytápění, 2008. Sešit projektanta - pracovní podklady. ISBN 978-80-02-02064-6.
- [156] RAŽNJEVIĆ, Kuzman. *Termodynamické tabulky*. Bratislava: Alfa, 1984. Edícia energetickej literatúry.
- [157] MARLOW, . Technical data sheet for TG12-6: single-stage thermoelectric generator. *Thermoelectric Cooling Technologies / II-VI Marlow* [online]. Texas, USA, 2019 [cit. 2019-07-10]. Dostupné z: https://cdn2.hubspot.net/hubfs/547732/Data_Sheets/TG12-6.pdf
- [158] GM200-161-12-40: Thermoelectric generator module. *European Thermodynamics / Intelligent Thermal Management* [online]. Leicester, UK: European Thermodynamics Limited, b.r. [cit. 2019-07-18]. Dostupné z: [https://www.eurothermodynamics.com/products/datasheets/GM200-161-12-40%20\(2\).pdf](https://www.eurothermodynamics.com/products/datasheets/GM200-161-12-40%20(2).pdf)
- [159] *Maple: The Essential Tool for Mathematics* [online]. Waterloo, Kanada: Waterloo Maple Inc., 2019 [cit. 2019-07-19]. Dostupné z: <https://www.maplesoft.com/products/Maple/>
- [160] BRAZDIL, Marian a Jiri POSPISIL. Thermoelectric Power Generation Utilizing the Waste Heat from a Biomass Boiler. *Journal of Electronic Materials* [online]. 2013, **42**(7), 2198-2202 [cit. 2019-07-23]. DOI: 10.1007/s11664-013-2570-7. ISSN 0361-5235. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11664-013-2570-7>
- [161] BRÁZDIL, Marian, Ladislav ŠNAJDÁREK, Petr KRACÍK a Jiří POSPÍŠIL. Automatic Biomass Boiler with an External Thermoelectric Generator. *Acta Polytechnica* [online]. 2014, **54**(1), 6-9 [cit. 2017-01-11]. DOI: 10.14311/AP.2014.54.0006. Dostupné z: <https://ojs.cvut.cz/ojs/index.php/ap/article/view/2039>

- [162] KLUZOVÁ, Ivana. *Měření a vyhodnocování výkonových parametrů termoelektrického generátoru malého výkonu*. Brno, 2016. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Marian Brázdil.
- [163] FRANK, Vojtěch. *Měření a vyhodnocování výkonových parametrů termoelektrického gnerátoru malého výkonu*. Brno, 2016. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Marian Brázdil.
- [164] RUSSELL, Charles. *Elements of energy conversion*. 1st ed. Oxford, NY: Pergamon Press, 1967.
- [165] WOOD, C. Materials for thermoelectric energy conversion. *Reports on Progress in Physics*. 1988, **51**(4), 459-539. DOI: 10.1088/0034-4885/51/4/001. Dostupné také z: <http://stacks.iop.org/0034-4885/51/i=4/a=001?key=crossref.8a0fcbbd4590f73612fa08a02674e70a>
- [166] POLOZINE, Alexandre, Susanna SIROTINSKAYA a Lirio SCHAEFFER. History of Development of Thermoelectric Materials for Electric Power Generation and Criteria of their Quality. *Materials Research* [online]. 2014, **17**(5), 1260-1267 [cit. 2017-03-15]. DOI: 10.1590/1516-1439.272214. Dostupné z: <http://www.scielo.br/pdf/mr/v17n5/a19v17n5.pdf>
- [167] ANATYCHUK, Lukyan a Vilius MIKHAILOVSKY. Progress in the Research and Development of Organic Fueled Thermogenerators. *Journal of Thermoelectricity* [online]. United States: International Thermoelectric Society, 2004, (4), 5-36 [cit. 2017-02-10]. ISSN 1607-8829. Dostupné z: http://www.nbuu.gov.ua/old_jrn/natural/te/2004_4/mikh.eng.pdf
- [168] *Safety Device for Gas Burners*. 1937. USA. US2097838(A). Uděleno 30.6.1931. Zapsáno 2.11.1937.
- [169] DIX, George. *MND-P-2352: Final Safety Analysis Report - SNAP 1A Radioisotope Fueled Thermoelectric Generator*. 1st ed. Baltimore, Maryland, USA: Nuclear Divison, Martin Company, 1960. Dostupné také z: <https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc866906/m1/>
- [170] CORLISS, Wiliam a Robert MEAD. *Power from Radioisotopes*. Rev. ed. Oak Ridge, Tennessee, USA: United States Atomic Energy Commission, Division of Technical Information, 1971. Dostupné také z: <https://www.osti.gov/includes/opennet/includes/Understanding%20the%20Atom/Power%20from%20Radioisotopes%20V.3.pdf>
- [171] *Combustion Device Utilizing Thermoelectric Generation*. 2010. WO2010042574A1. Zapsáno 15.4.2010.
- [172] *Improvements on Thermo-Electric Piles*. 1875. Kanada. CA4616(A). Zapsáno 10.4.1875.
- [173] KUESER, P., J. MCCABRIA a D. NAUMER. Experimental Results from a Solar Heated Thermoelectric Generator Utilizing Thermal Energy Storage. *IEEE Transactions on Aerospace* [online]. Piscataway, New Jersey, USA: IEEE, 1964, **2**(2), 675-681. DOI: 10.1109/TA.1964.4319653. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4319653/>
- [174] ALLEN, Robert. *Compact, Lightweight Thermoelectric Generators*. New York, USA: Society of Automotive Engineers International, 1964, , 6. DOI: 10.4271/640267. Dostupné také z: <http://papers.sae.org/640267/>
- [175] FRAENKEL, Peter. *The Power Guide: A Catalogue of Small Scale Power Equipment*. 1st ed. Rugby, England: Intermediate Technology Publications, b.r.
- [176] NEILD, A. *Thermoelectric Generators for Military Portable Power* [online]. New York, USA: Society of Automotive Engineers International, 1967, , 1-10 [cit. 2019-07-14]. DOI: 10.4271/670452. Dostupné z: <http://papers.sae.org/670452/>

- [177] NYSTROM, Thomas a Shigeru MORITA. 100 Watt Liquid Fueled Thermoelectric Generator. *Telecommunications Energy Conference*. Washington, D.C., USA: IEEE, 1979, , 215-219. DOI: 10.1109/INTLEC.1979.4793631. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4793631/>
- [178] BIOLITE, . CampStove: Turn Fire into Electricity Using Wood. *BioLite - Outdoor & Off-Grid Energy* [online]. 2017 [cit. 2017-02-08]. Dostupné z: <http://www.bioliteenergy.com/products/biolite-campstove>
- [179] KRISTIANSEN, N., G. SNYDER, H. NIELSEN a L. ROSENDAHL. Waste Heat Recovery from a Marine Waste Incinerator Using a Thermoelectric Generator. *Journal of Electronic Materials* [online]. 2012, **41**(6), 1024-1029 [cit. 2019-06-14]. DOI: 10.1007/s11664-012-2009-6. ISSN 0361-5235. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11664-012-2009-6>
- [180] STÁTNÍ FOND ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ ČR, . Kotlíkové dotace. *Operační program Životní prostředí* [online]. Praha: Ministerstvo životního prostředí, Státní fond životního prostředí ČR, 2019 [cit. 2019-07-02]. Dostupné z: <https://www.opzp.cz/o-programu/kotlikove-dotace/>
- [181] TOPINFO, . Vytápění: výměny kotlů. *TZB-info* [online]. Praha: Topinfo s.r.o., 2019 [cit. 2019-07-04]. Dostupné z: <https://vytapieni.tzb-info.cz/vymeny-kotlu>

P1: Historický přehled vybraných termoelektrických generátorů a jejich parametrů

Tab. P1 Vybrané historické termoelektrické generátory a přehled jejich parametrů [71-74, 78, 164-178]

Rok vzniku	Země původu	Autor / výrobce	Typ / označení	Použití	Zdroj tepla	Způsob chlazení	El. výkon TEG (W)	Účinnost TEG (%)	T _c (°C)	Th (°C)	ΔT (°C)
1823	Francie	Oersted, H., Fourier J.	-	Studium termoelektrických jevů	Svíčka	Ledem					
1826	Německo	Ohm, G.	-	Demonstrační	Vroucí voda	Ledem					
1834	Francie	Peltier, G.	-	Demonstrační							
1831	Itálie	Nobili, L., Melloni M.	-	Termoelektrický článek	Záření	Vzduchem					
1840		Pouillet, C.	-								
1843	Velká Británie	Pool, M.	-	Demonstrační	Sand bath	Vodou					
1860		Ruhmkorff, H.D.	-		Plynový hořák	Vodou					
1864-1865	Rakousko	Markus, S.	-	Demonstrační	Plynový hořák	Vodou / vzduchem					
1866	Francie	Becquerel	-	Zkoumání elektrochemických reakcí	Plynový hořák	Vzduchem				360	
1867		Farmer, M., G.	-	Průmyslové							
1869	Francie	Clamond, C., Mure, M.	-	Demonstrační	Plynový hořák	Vzduchem					
1871	Rakousko	Noë, F.	-		Plynový hořák	Vzduchem		0,3			
1874	Francie	Clamond, C., Mure, M.	-	Zdroje pro elektrochemické reakce	Plynový hořák	Vzduchem		0,6			
1875	Francie	Clamond, M. C.	-								
1879	Francie	Clamond, M. C., du Moncel, Th.	-	Svícení	Spalování uhlí, koks	Vzduchem	192			723	
1885	Německo	Schodron	-		Plynový hořák	Vodou	20	0,9			
1887		Raub	-		Plynový hořák	Vodou	120	1,2			
1887-1889	Německo	Gülcher, R. J. (Julius Pinch company)	-	Galvanoplastic, electrolytic works, battery charging	Spalování svítiplynu	Vzduchem	2/ 4,5/ 6	1,08			
1906	Německo	Heil, A. (Wolf and company)	-	Svícení	Plynový hořák	Vzduchem	1,2 (1-15)				
1927	Francie	Wall, T.	-	Napájení radiových stanic, nabíjení baterií	Plynový hořák	Vzduchem	13,7	0,04			
1928	SSSR	Chechik, P.O.	-	Napájení radiových stanic, nabíjení baterií	Petrolejová lampa	Vzduchem	-				
1937	SSSR	Ivakhnenko, A.G.	-	Napájení radiových stanic, nabíjení baterií	Petrolejová lampa	Vzduchem	-	0,1			
1937	USA	Karrer, S.	-		Plynový hořák						
1940-1941	SSSR	Ioffe, A.F., Devyatkova, E., Maslakovets, Yu.N. (LFTI)	-	Demonstrační prototyp	Petrolejový hořák	Vroucí vodou	2	3			
1941	SSSR	Ioffe, A.F. (LFTI)	TG-1	Napájení rozhlasových stanic	Spalování dříví	Vroucí vodou	-	1,5 – 2,0			

Rok vzniku	Země původu	Autor / výrobce	Typ / označení	Použití	Zdroj tepla	Způsob chlazení	El. výkon TEG (W)	Účinnost TEG (%)	T _c (°C)	Th (°C)	ΔT (°C)
1945	SSSR	Ioffe, A.F., Voronin, A.N.	-	Napájení rozhlasového vybavení	Spalování uhlí	Vroucí vodou	4				
			-	Napájení rozhlasového vybavení	Spalování uhlí	Vzduchem	4	2,5?			
1945	SSSR			Napájení rozhlasového vybavení, svícení	Spalování dříví	-	200/ 500				
1950-1954	SSSR	Ioffe, A.F., Voronin, A.N., (LFTI)	TGK-1	Napájení rozhlasových stanic	Petrolejová lampa	Vzduchem	1,6	0,2			
			TGK-2-2	Napájení rozhlasových stanic	Petrolejová lampa	Vzduchem	1,6	0,2			200
			TGK-3	Napájení rozhlasových stanic	Petrolejová lampa	Vzduchem	1,5 (5)	0,3			
1954	USA	Telkes, M.	-		Solární záření		0,165				46
1954-1955	SSSR	Voronin, A.N., Daniel-Beck, V.S.	TGK-9	Napájení radiových stanic	Petrolejová kamna	Vzduchem	9,6				
			TGK-10	Napájení radiových stanic	Petrolejová kamna	Vzduchem	9,6 (10,8)				
			TGU-1	Napájení radiových stanic	Petrolejová kamna	Vzduchem	9,6				
1959	SSSR		TGG-10	Katodická ochrana	Petrolejový hořák	Vzduchem	10	1,0			
			TGG-16	Katodická ochrana	Petrolejový hořák	Vzduchem	16	1,0			
1959	USA	(The Martin Company)	SNAP-1A		Teplo rozpadu ¹⁴⁴ Ce	-	125		168	579	411*
1959	USA	(The Martin Company)	SNAP-3 (3M1C1)		Teplo rozpadu ²¹⁰ Po	-	2,4	5	79,4	382	302,6*
1959	USA	Schuh, N.F., Tallent, R.J, (Westinghaus Electric Corporation; Boeing Airplane Company)			Solární záření	Zářením					
1961	USA		SNAP-3A	Napájecí zdroj pro navigační satelit	Teplo rozpadu ²³⁸ Pu	Zářením	2,7			510	
1961	USA	(The Martin Company)	SNAP-7A		Teplo rozpadu ⁹⁰ Sr						
1961	USA	(The Martin Company.)	SNAP-7E		Teplo rozpadu ²³⁵ U						
1961	USA		SNAP-3B		Teplo rozpadu ²³⁸ Pu		2,7				
1961	Francie	O'Nora, M. (Alcatel)	Gazel-4	Napájecí zdroj pro katodickou ochranu a zdroj pro meteorologické stanice	Spalování propanu, butanu	Vzduchem	80	2,6			
1962	Francie	Shtol, R. (Tomson CSF)	TG-50	Napájecí zdroj pro katodickou ochranu a zdroj pro meteorologické stanice	Spalování propanu	Vzduchem	50	2,8			
1963	USA				Spalování petroleje a benzínu	Vodou	300				
1963-1964	USA		SNAP-9A	Napájecí zdroj pro navigační satelit	Teplo rozpadu ²³⁸ Pu	Zářením	25			510	
1964	USA	Kueser, P.E., McCabria, J.L., Naumer, D.A. (Westinghaus Electric Corporation)	-	-	Solární záření	Zářením	14,4	4,22			
1964	USA	Robert C. Allen (North American Aviation, Inc.)	BANTAM-75	-	Spalování pevných paliv		75				
1964	USSR	Voronin, A.N. (Institute of Semiconductors AN USSR)	TEG-50	Napájecí zdroj pro katodickou ochranu	Plynový hořák	Vzduchem	50	1,0	130	350 - 400	
1964	USSR	Voronin, A.N. (Institute of Semiconductors AN USSR)	TEG-300	Napájecí zdroj pro katodickou ochranu	Plynový hořák	Vzduchem	300	1,0			
1964	Francie	Shtol, R. (Tomson CSF)	TG-100	Napájecí zdroj pro katodickou ochranu	Spalování propanu	Vzduchem	100	2,8			
1965	USA		SNAP-10A	Experimentální	Teplo rozpadu ²³⁵ U	Zářením					
1965-1970	USA	Shreiber, O.,Ruo, F., (Teledyne Energy System)	T3	Napájecí zdroj pro komunikační systémy	Spalování metanu, butanu	Vzduchem	3	2,5			
			2T1P	Napájecí zdroj pro komunikační systémy	Spalování metanu, butanu	Vzduchem	10	2,2			
			2T8P	Napájecí zdroj pro katodickou ochranu	Spalování metanu, butanu	Vzduchem	80	2,2			
			5T	Napájecí zdroj pro navigační zařízení	Spalování metanu, butanu	Vzduchem	90	2,2			

PI: Historický přehled vybraných termoelektrických generátorů a jejich parametrů /

Rok vzniku	Země původu	Autor / výrobce	Typ / označení	Použití	Zdroj tepla	Způsob chlazení	El. výkon TEG (W)	Účinnost TEG (%)	T _c (°C)	T _h (°C)	ΔT (°C)
1966	USA	Gershakovsky, A.		Napájecí zdroj pro navigační zařízení	Spalování metanu, butanu	Vzduchem	100	2,1			
1966	USA										
1967	Německo	Dietrich, N., (Grundig)	MT 2/3	Napájecí zdroj pro radiové vybavení	Spalování petroleje a benzínu	Vzduchem	3				
1968-1969	USA	(NASA)	SNAP-19B2 (B3)	Napájecí zdroj pro meteorologické účely	-	Zářením	30			482	
1969-1972	USA	(NASA)	SNAP-27	Lunární napájecí zdroj (Apollo 12 - Apollo 17)	-	Zářením	73			570	
1969-1970	SSSR	Kolomojets, N.V., Dudkin, L.D. (VNIIT)	UGM-1	Napájecí zdroj pro dočasné stanice na pohybujících se krách	Spalování propanu	Vzduchem	2,5	2,2			
			UGM-80	Napájecí zdroj pro katodickou ochranu a zdroj pro distribuci plynu/plynové příslušenství	Spalování metanu, propanu	Vzduchem	80				
			UGM-100CX	Napájecí zdroj zemědělských objektů	Spalování metanu, propanu	Vzduchem	100	2,6			
1972-1973	USA	(NASA)	SNAP-19	Planetární zdroj pro průzkum vesmíru	Teplo rozpadu radioaktivního prvku		41			516	
1975	USA	(NASA)	SNAP-19	Napájecí zdroj pro průzkum Marsu a vesmíru	Teplo rozpadu radioaktivního prvku		43			550	
1977	USA	(NASA)	MHW	Planetární zdroj pro průzkum vesmíru	Teplo rozpadu ²³⁸ Pu	Zářením	155			1000	
1979	Kanada	Nistrom, T.L., Morita, S. (Global Thermoelectric Power systems) Japonsko (Nippon Electric Company)		Napájecí zdroj radiových komunikačních systémů	Spalování petroleje, nafty, leteckého paliva, benzínu	Vzduchem - přirozená konvekce	100		160	540	
1982	USA	(General Atomic Company)		Napájecí zdroj radiových komunikačních systémů	Spalování petroleje, nafty	Kapalina	1500				
1988		Karlsruhe			Spaliny automobilu		58				490
1990	Rusko	Pustovalov, A.A., Gusev, V.V. (Biapos)	CATEG 15/12	Napájecí zdroj pro katodickou ochranu	Spalování metanu, butanu	Vzduchem	15	2,2			
			CATEG 30/24	Napájecí zdroj pro katodickou ochranu	Spalování metanu, butanu	Vzduchem	30	2,3			
			CATEG 60/24	Napájecí zdroj pro katodickou ochranu	Spalování metanu, butanu	Vzduchem	60	2,2			
			CATEG 90/24	Napájecí zdroj pro katodickou ochranu	Spalování metanu, butanu	Vzduchem	90	2,3			

* Hodnoty dopočítané a/nebo odečtené z grafů.

P2: Historický přehled vybraných termoelektrických generátorů a jejich parametrů

Tab. P2 Parametry kamen a kotlů pro teplovodní vytápění [101-133]⁹

Typ spal. zařízení	Typ kotle	Palivo	Výrobce	Země původu	Označení	Jm. výkon (kW)	Max. tepelná účinnost (%)	Teplota spalín při Jm. výkonu (°C)	Teplota spalín při min. výkonu (°C)	Emisní třída	Ekodesign	Tř. energetické účinnosti	Užitečná účinnost při Jm. výkonu (%)	Sezónní en. účinnost (%)	Index EEI	El. příkon Maximální (W)	El. příkon při spouštění (W)	El. příkon Provoz (W)	El. příkon Minimální (W)	El. příkon v stand by (W)	Ruční zapalování
Kamna	Automatická	Dřevní pelety	EdilKamin S.p.a.	Itálie	Ania	8	90,1										400	120			
Kamna	Automatická	Dřevní pelety	EdilKamin S.p.a.	Itálie	Blade	12,1	90,4	164									300	50			
Kamna	Automatická	Dřevní pelety	Centrometal Tehnika Grijanja	Chorvatsko	Z6	5,53	93,34											98 až 300			
Kamna	Automatická	Dřevní pelety	Centrometal Tehnika Grijanja	Chorvatsko	Z12	9,05	92,7											99 až 300			
Kamna	Automatická	Dřevní pelety	Centrometal Tehnika Grijanja	Chorvatsko	ZR12	9,05	92,7											100 až 300			
Kamna	Automatická	Dřevní pelety	Viadrus (ŽDB Group) - Bohumín	Česká repulika	Aguro	6,4	87,3	143									135	25			
Kamna s tepl. výměníkem	Automatická	Dřevní pelety	Centrometal Tehnika Grijanja	Chorvatsko	ZV16	16,1	95,9									450	320	110 až 320			
Kamna s tepl. výměníkem	Automatická	Dřevní pelety	Centrometal Tehnika Grijanja	Chorvatsko	ZV20	18,46	94,3										350	140 až 350			
Kamna s tepl. výměníkem	Automatická	Dřevní pelety	Centrometal Tehnika Grijanja	Chorvatsko	ZV24	22,14	95,4										350	140 až 350			
Kamna s tepl. výměníkem	Automatická	Dřevní pelety	Centrometal Tehnika Grijanja	Chorvatsko	ZV32	30,48	95,74										350	140 až 350			
Kamna s tepl. výměníkem	Automatická	Dřevní pelety	Kalor	Itálie	Allesia 14 Idro	14,79	96,29											110 až 320			
Kamna s tepl. výměníkem	Automatická	Dřevní pelety	Kalor	Itálie	Francesca 17 Idro	18												110 až 320			
Kamna s tepl. výměníkem	Automatická	Dřevní pelety	Kalor	Itálie	Marta 20 Idro	19,03												140 až 360			
Kamna s tepl. výměníkem	Automatická	Dřevní pelety	Kalor	Itálie	Llaria 24 Idro	23,12												140 až 350			
Kamna s tepl. výměníkem	Automatická	Dřevní pelety	Kalor	Itálie	Ada 28 Idro	27,34												140 až 350			
Kamna s tepl. výměníkem	Automatická	Dřevní pelety	Kalor	Itálie	Dora 32 Idro	32,41												140 až 350			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Atmos - Bělá pod Bezdězem	Česká repulika	D 14 P	14	90,3	127		5	Ekodesign	A+		78	115		522	42			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Atmos - Bělá pod Bezdězem	Česká repulika	D 21 P	19,5	90,3	147		5	Ekodesign	A+		78	115		522	42			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Atmos - Bělá pod Bezdězem	Česká repulika	D 25 P	24	90,2	151		5	Ekodesign	A+		78	115		522	42			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Atmos - Bělá pod Bezdězem	Česká repulika	D 31 P	30	90,2	147		5	Ekodesign	A+		79	116		520	97			

⁹ V tabulce uvedené údaje nejsou veškerými údaji uváděnými výrobcí a prodejci kotlů. Část parametrů, které nemají vliv na celkové hodnocení příkonu kotlů uváděné v práci, nebyly do tabulky uvedeny. Stav platný k 2/2018. Aktuální údaje se mohou lišit.

P2: Historický přehled vybraných termoelektrických generátorů a jejich parametrů /

Typ spal. zařízení	Typ kotle	Palivo	Výrobce	Země původu	Osazení	Jm. výkon (kW)	Max. tepelná účinnost (%)	Teplota spalín při jm. výkonu (°C)	Teplota spalín při min. výkonu (°C)	Emisní třída	Ekodesign	Tř. energetické účinnosti	Užitečná účinnost při jm. výkonu (%)	Sezónní en. účinnost (%)	Index EEI	El. příkon Maximální (W)	El. příkon při spouštění (W)	El. příkon Provoz (W)	El. příkon Minimální (W)	El. příkon v stand by (W)	Ruční zapalování
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Atmos - Bělá pod Bezdězem	Česká repulika	D 15 P	15	90,4	141		5	Ekodesign	A+		79	116		522	42			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Atmos - Bělá pod Bezdězem	Česká repulika	D 20 P	22	91,1	128		5	Ekodesign	A+		79	117		572	92			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Atmos - Bělá pod Bezdězem	Česká repulika	D 30 P	29,8	92,4	158		5	Ekodesign	A+		81	119		530	97			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Atmos - Bělá pod Bezdězem	Česká repulika	D 40 P	40	91	157		5	Ekodesign	A+		81	119		530	97			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Atmos - Bělá pod Bezdězem	Česká repulika	D 50 P	50	91,1	123		5	Ekodesign	A+		78	115		530	97			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Atmos - Bělá pod Bezdězem	Česká repulika	D 80 P	80	91,2	150		5	Ekodesign	A+		80	118		635	142			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Atmos - Bělá pod Bezdězem	Česká repulika	D 15 PX	15	92,7	118		5	Ekodesign	A+		81	120	1092	572	92			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Atmos - Bělá pod Bezdězem	Česká repulika	D 20 PX	20	91,5	142		5	Ekodesign	A+		81	120	1092	572	92			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Agromechanika - Lhenice	Česká repulika	AM24	24	88			3							-	100			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Agromechanika - Lhenice	Česká repulika	AM42	42	86			3							-	100			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Agromechanika - Lhenice	Česká repulika	AM15BIO	13	87,1			5							-	100			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Agromechanika - Lhenice	Česká repulika	AM24BIO	24	88,7			5	Ekodesign						-	100			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Agromechanika - Lhenice	Česká repulika	AM42BIO	44	86,2			5							-	100			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Agromechanika - Lhenice	Česká repulika	AM26 Combi	24,4	90,2				Ekodesign						-	95			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	EdilKamin S.p.a.	Itálie	Ottawa Up	24										400	400	150			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	EdilKamin S.p.a.	Itálie	Atlanta Up	32,3										400	400	150			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	EdilKamin S.p.a.	Itálie	Laguna P12	11										400	400	150			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	EdilKamin S.p.a.	Itálie	Laguna P18	17										400	400	150			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	EdilKamin S.p.a.	Itálie	Laguna P24	22										400	400	150			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	EdilKamin S.p.a.	Itálie	Laguna P35	31										400	400	150			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Benekov - Horní Benešov	Česká repulika	B 14 P	14	90,6	130		5		A+						35	14	5	ANO
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Benekov - Horní Benešov	Česká repulika	B 20	19	92,4	135		5	Ekodesign					135		33	16	6	ANO
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Benekov - Horní Benešov	Česká repulika	C 16 P	19	92,1	108		5	Ekodesign	A+						33	15	6	ANO
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Benekov - Horní Benešov	Česká repulika	C 17	19	94	117		4	Ekodesign	A+				135		33	16	6	ANO
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Benekov - Horní Benešov	Česká repulika	C 26 P	25	90,8	109		5	Ekodesign	A+						38	15	6	ANO
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Benekov - Horní Benešov	Česká repulika	C 27	25	95	84		5	Ekodesign	A+				118		40	16	6	ANO
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Benekov - Horní Benešov	Česká repulika	C 37	35	94	97		4	Ekodesign					153		50	19	7	ANO
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Benekov - Horní Benešov	Česká repulika	C 51 P	49	90,7	95		5	Ekodesign	A+						51	23	6	ANO
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Benekov - Horní Benešov	Česká repulika	C 57	49	92	115		4	Ekodesign					153		63	24	7	ANO
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Benekov - Horní Benešov	Česká repulika	K 14	15	91,3	115		5	Ekodesign	A+						45	29	3	
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Benekov - Horní Benešov	Česká repulika	K 20	20	90,4	135		5	Ekodesign	A+						55	29	3	
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Benekov - Horní Benešov	Česká repulika	K 25	25	89,5	150		5	Ekodesign	A+						64	29	3	
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Benekov - Horní Benešov	Česká repulika	R 16	20	92,1	108		5	Ekodesign	A+						33	15	6	ANO
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Benekov - Horní Benešov	Česká repulika	R 26	26	90,8	109		5	Ekodesign	A+						38	15	6	ANO
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Benekov - Horní Benešov	Česká repulika	R 51	49	90,7	95		5	Ekodesign	A+						51	23	6	ANO
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Benekov - Horní Benešov	Česká repulika	R 100	99	89	160		4						483		250	90	10	ANO
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Benekov - Horní Benešov	Česká repulika	S 16	20	92,1	108		5	Ekodesign	A+						33	15	6	ANO
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Benekov - Horní Benešov	Česká repulika	S 26	26	90,8	109		5	Ekodesign	A+						38	15	6	ANO
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Benekov - Horní Benešov	Česká repulika	S 51	49	90,7	95		5	Ekodesign	A+						51	23	6	ANO
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Attack	Slovensko	Attack Pellet 30 Automatic Plus	28,7	90,6	143		5		A+	82,3	76	113	600		90		5	
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Attack	Slovensko	Attack FD20 Pellet	29,5	78,2					A+		72	106			62	31	5	
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Attack	Slovensko	Attack FD26 Pellet																
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Attack	Slovensko	Attack FD32 Pellet																
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Attack	Slovensko	Attack FD36 Pellet																
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Attack	Slovensko	Attack FD42 Pellet																
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Centrometal Tehnika Grijanja	Chorvatsko	CentroPelet ZVB 16	14,4	89,11											350	140		

P2: Historický přehled vybraných termoelektrických generátorů a jejich parametrů /

Typ spal. zařízení	Typ kotle	Palivo	Výrobce	Země původu	Označení	Jm. výkon (kW)	Max. tepelná účinnost (%)	Teplota spalín při jm. výkonu (°C)	Teplota spalín při min. výkonu (°C)	Emisní třída	Ekodesign	Tř. energetické účinnosti	Užitečná účinnost při jm. výkonu (%)	Sezónní en. účinnost (%)	Index EEI	El. příkon Maximální (W)	El. příkon při spouštění (W)	El. příkon Provoz (W)	El. příkon Minimální (W)	El. příkon v stand by (W)	Ruční zapalování
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Centrometal Tehnika Grijanja	Chorvatsko	CentroPelet ZVB 20	17,51	92,13											300	100		
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Centrometal Tehnika Grijanja	Chorvatsko	CentroPelet ZVB 24	21,51	90,39											300	100		
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Centrometal Tehnika Grijanja	Chorvatsko	CentroPelet ZVB 32	29,14	91,64											300	100		
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Centrometal Tehnika Grijanja	Chorvatsko	PelTec 12	12		120		5		A+				1050					
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Centrometal Tehnika Grijanja	Chorvatsko	PelTec 18	18		120		5		A+				1050					
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Centrometal Tehnika Grijanja	Chorvatsko	PelTec 24	24		120		5		A+				1050					
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Centrometal Tehnika Grijanja	Chorvatsko	PelTec 36	36		120		5		A+				1100					
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Centrometal Tehnika Grijanja	Chorvatsko	PelTec 48	48		120		5		A+				1100					
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Centrometal Tehnika Grijanja	Chorvatsko	BioTec Plus 25	25		90 až 130		5		A+				1100		45	30	5	
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Centrometal Tehnika Grijanja	Chorvatsko	BioTec Plus 29	29		91 až 130		5		A+				1100		46	31	5	
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Centrometal Tehnika Grijanja	Chorvatsko	BioTec Plus 31	31		92 až 130		5		A+				1100		47	32	5	
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Centrometal Tehnika Grijanja	Chorvatsko	BioTec Plus 35	35		93 až 130		5		A+				1100		48	33	5	
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Centrometal Tehnika Grijanja	Chorvatsko	BioTec Plus 45	45		94 až 130		5		A+				1100		50	35	5	
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Dakon	Česká repulika	DOR N 15 Automat – Pelety	15	82 až 88			5	Ekodesign	A+				240		85	30		ANO
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Dakon	Česká repulika	DOR N 20 Automat – Pelety	20	83 až 88			5	Ekodesign	A+				240		100	35		ANO
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Dakon	Česká repulika	DOR N 25 Automat – Pelety	27	84 až 88			5	Ekodesign	A+				240		120	40		ANO
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Dakon	Česká repulika	DOR 5N 25 Automat	25	92			5	Ekodesign	A+					145	45	15		
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Dakon	Česká repulika	DOR 5F 18 Pelety	18	91	112		5	Ekodesign	A+				600	415	39	18	5	
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Dakon	Česká repulika	DOR 5F 24 Pelety	24	92	122		5	Ekodesign	A+				600	415	41	18	5	
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Easypell (Eco Engineering 2050 GmbH)	Rakousko	Easypell 16	16	93,1	160		5	Ekodesign	A+			118,7						
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Easypell (Eco Engineering 2050 GmbH)	Rakousko	Easypell 20	20	93,6	160		5	Ekodesign	A+			119,8						
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Easypell (Eco Engineering 2050 GmbH)	Rakousko	Easypell 25	25	94,3	160		5	Ekodesign	A+			121,2						
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Easypell (Eco Engineering 2050 GmbH)	Rakousko	Easypell 32	32	95,3	160		5	Ekodesign	A+			123						
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Ekogalva	Česká repulika	Ekoscroll Alfa 19kW	19				5	Ekodesign	A+				101					ANO
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Ekogalva	Česká repulika	Ekoscroll Alfa 25kW	25				5	Ekodesign	A+				101					ANO
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Ekogalva	Česká repulika	Ekoscroll Alfa 28kW	28				5	Ekodesign	A+				101					ANO
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Ekogalva	Česká repulika	Ekoscroll Alfa 32kW	32				5	Ekodesign	A+				110					ANO
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Ekogalva	Česká repulika	Ekoscroll Alfa 38kW	38				5	Ekodesign	A+				110					ANO
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Ekogalva	Česká repulika	Ekoscroll Alfa 42kW	42				5	Ne	A+				110					ANO
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Ekogalva	Česká repulika	Ekoscroll Alfa 49kW	49				5	Ne	A+				110					ANO
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Ekogalva	Česká repulika	Ekoscroll Alfa 60kW	60				5	Ne	A+				245					ANO
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Ekogalva	Česká repulika	Ekoscroll Alfa 76kW	76				5	Ne	-				245					ANO
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Ekogalva	Česká repulika	Ekoscroll Economic 25kW	25				5	Ekodesign	A+				101					ANO
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Ekogalva	Česká repulika	Ekoscroll Economic 32kW	32				5	Ne	A+				110					ANO
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Ekogalva	Česká repulika	Ekoscroll Economic 40kW	40				5	Ne	A+				110					ANO
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Ekogalva	Česká repulika	Ekoscroll Economic 49kW	49				5	Ne	A+				110					ANO
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Ekogalva	Česká repulika	EkoScroll Beta 14	14	92,8	128	103	5		A+				420	188	23	10		
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Ekogalva	Česká repulika	EkoScroll Beta 18	18	92,8	129	103	5		A+				420	188	28	12		
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Ekogalva	Česká repulika	EkoScroll Beta 25	25	90,8	130	102	5		A+				420	188	33	14		
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Ekogalva	Česká repulika	EkoScroll Beta 28	28	90,8	139	106	5		A+				420	188	39	15		
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Ekogalva	Česká repulika	EkoScroll Beta 37	37	90,8	130	106	5		A+				450	188	50	18		
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Ekogalva	Česká repulika	EkoScroll Beta 50	49,9	92,3	131	106	5		A+				450	188	55	20		
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Ekogalva	Česká repulika	EkoScroll Beta 56	56	92,3	133	106	5		A+				450	188	61	23		

P2: Historický přehled vybraných termoelektrických generátorů a jejich parametrů /

Typ spal. zařízení	Typ kotle	Palivo	Výrobce	Země původu	Osazení	Jm. výkon (kW)	Max. tepelná účinnost (%)	Teplota spalín při jm. výkonu (°C)	Teplota spalín při min. výkonu (°C)	Emisní třída	Ekodesign	Tř. energetické účinnosti	Užitečná účinnost při jm. výkonu (%)	Sezónní en. účinnost (%)	Index EEI	El. příkon Maximální (W)	El. příkon při spouštění (W)	El. příkon Provoz (W)	El. příkon Minimální (W)	El. příkon v stand by (W)	Ruční zapalování
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Ekogalva	Česká repulika	V8 Plus 26kW	26				3		A				240					
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Ekogalva	Česká repulika	V8 Plus 32kW	32				3		A				240					
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Ekogalva	Česká repulika	V8 Plus 38kW	38				4		A+				264					
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Ekogalva	Česká repulika	V8 Plus 45kW	45				4		A+				264					
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Viadrus (ŽDB Group) - Bohumín	Česká repulika	AOC-S16P (LP)	16	85,1	192	119	3		A+		70	104			32	18	2	
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Viadrus (ŽDB Group) - Bohumín	Česká repulika	AOC-A16P (LP)	16,5	90	137	81	5	Ekodesign	A+		77	113			32	18	2	
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Viadrus (ŽDB Group) - Bohumín	Česká repulika	AOC-S20P-00.16	20	83,3	211	114,5	4		A+		72	107			46	22	3	
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Viadrus (ŽDB Group) - Bohumín	Česká repulika	AOC-A20P-00.16	20	90	113	74	5	Ekodesign	A+		77	114			46	22	3	
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Viadrus (ŽDB Group) - Bohumín	Česká repulika	AOC-S20P (LP)	20	83,3	211	114	4		A+		72	107			38	18	2	
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Viadrus (ŽDB Group) - Bohumín	Česká repulika	AOC-A20P (LP)	20	90,5	117	74	5	Ekodesign	A+		77	114			38	18	2	
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Viadrus (ŽDB Group) - Bohumín	Česká repulika	AOC-S24P (LP)	25	87	163	107	4		A+		73	109			38	16	2	
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Viadrus (ŽDB Group) - Bohumín	Česká repulika	AOC-A24P (LP)	25	88,9	135	79	5	Ekodesign	A+		78	115			38	16	2	
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Viadrus (ŽDB Group) - Bohumín	Česká repulika	AOC-S28P-00.16	28	86,9	154	96	4		A+		76	113			49	19	3	
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Viadrus (ŽDB Group) - Bohumín	Česká repulika	AOC-A28P-00.16	28	91,5	109	70	5	Ekodesign	A+		80	117			49	19	3	
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Viadrus (ŽDB Group) - Bohumín	Česká repulika	AOC-S28P (LP)	28	86,9	154	96	4		A+		76	113			43	17	2	
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Viadrus (ŽDB Group) - Bohumín	Česká repulika	AOC-A28P (LP)	28	90,4	99	70	5	Ekodesign	A+		80	117			43	17	2	
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Viadrus (ŽDB Group) - Bohumín	Česká repulika	AOC-S32P (LP)	32	84,2	184	82	4		A+		77	114			49	20	2	
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Viadrus (ŽDB Group) - Bohumín	Česká repulika	AOC-A32P (LP)	32	89,7	130	79	5	Ekodesign	A+		79	117			49	20	2	
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Viadrus (ŽDB Group) - Bohumín	Česká repulika	A2C-S20P-00.16	20	90,1	117	90	5	Ekodesign	A+		79	116			43	19	2	
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Viadrus (ŽDB Group) - Bohumín	Česká repulika	A2C-S30P-00.16	30	91,3	109	80	5	Ekodesign	A+		79	116			82	26	4	
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Viadrus (ŽDB Group) - Bohumín	Česká repulika	A3C-S25	25	91,4	112	78	5	Ekodesign	A+		80	118	112		34	19	10	ANO
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Viadrus (ŽDB Group) - Bohumín	Česká repulika	A3C-S31	31	92,9	112	78	5	Ekodesign	A+		80	117	112		34	19	10	ANO
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Viadrus (ŽDB Group) - Bohumín	Česká repulika	A3C-S33	33	88,6	116	78	5	Ekodesign	A+		79	116	115		43	20	10	ANO
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Viadrus (ŽDB Group) - Bohumín	Česká repulika	A3C-S35	35	93	112	78	5	Ekodesign	A+		80	118	115		43	20	10	ANO
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Viadrus (ŽDB Group) - Bohumín	Česká repulika	A3W-S25P	25	87,3 (88,5)	150	85	5	Ekodesign	A+		79	117	105		39	20	10	ANO
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Viadrus (ŽDB Group) - Bohumín	Česká repulika	A3W-S25PB	25	88,5	150	85	5	Ekodesign	A+		79	117	105		25	16	10	ANO
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Viadrus (ŽDB Group) - Bohumín	Česká repulika	Hercules Green Eco Therm 25S	25	86,8	210	120	4		A+		76,9	109	1200		100			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Viadrus (ŽDB Group) - Bohumín	Česká repulika	Hercules Green Eco Therm 25J	25	86,8	210	120	4		A+		74,7	105	1200		100			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Viadrus (ŽDB Group) - Bohumín	Česká repulika	Hercules Green Eco Therm 32S	32	87,9	210	120	4		A+		74,8	105	1200		100			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Viadrus (ŽDB Group) - Bohumín	Česká repulika	Hercules Green Eco Therm 32J	32	87,9	210	120	4		A+		78,6	111	1200		100			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Viadrus (ŽDB Group) - Bohumín	Česká repulika	Hercules U26 P Robot - 5 čl.	24	87,3	207,2	108,9	4		A+		75	113	120		94	45	2	ANO
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Viadrus (ŽDB Group) - Bohumín	Česká repulika	Hercules U26 P Robot - 6 čl.	27,5	87,7	204,6	108	4		A+		76	113	120		89	45	2	ANO
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Viadrus (ŽDB Group) - Bohumín	Česká repulika	Hercules U26 P Robot - 7 čl.	31	88,1	202	107,1	4		A+		76	114	120		94	45	2	ANO
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Elektromet	Polsko	EKO-KWP MDP 15	15				5						860	860	280			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Elektromet	Polsko	EKO-KWP MDP 20	20				5						860	860	280			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Elektromet	Polsko	EKO-KWP MDP 25	25				5						860	860	280			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Elektromet	Polsko	Eko-PE MINI 20	18	90,4	110	85	5		A+		79,6	117	350	350	65			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Elektromet	Polsko	Eko-PE MINI 35	35	91,5	135	75	5		A+		82,2	120,8	350	350	65			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Elektromet	Polsko	Eko-PE Compact 20	18										350	350	65			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Elektromet	Polsko	Eko-PE Compact 35	35										350	350	65			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	ETA Heiztechnik	Rakousko	ETA-SH + TWIN Pellet Burner 20 kW	20	92			5		A+						61	46		
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	ETA Heiztechnik	Rakousko	ETA-SH + TWIN Pellet Burner 26 kW	26	91,5			5		A+						116	63		
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	ETA Heiztechnik	Rakousko	ETA-SH + TWIN Pellet Burner 40 kW	40	90,7			5		A+						116	65,8		
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	ETA Heiztechnik	Rakousko	ETA-SH + TWIN Pellet Burner 50 kW	49,9	90,3			5		A+						116	67		
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	ETA Heiztechnik	Rakousko	ETA-PU 7kW	7,7				5		A+						61	46		
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	ETA Heiztechnik	Rakousko	ETA-PU 11 kW	11,2				5		A+						63	46		

P2: Historický přehled vybraných termoelektrických generátorů a jejich parametrů /

Typ spal. zařízení	Typ kotle	Palivo	Výrobce	Země původu	Označení	Jm. výkon (kW)	Max. tepelná účinnost (%)	Teplota spalin při jm. výkonu (°C)	Teplota spalin při min. výkonu (°C)	Emisní třída	Ekodesign	Tř. energetické účinnosti	Užitečná účinnost při jm. výkonu (%)	Sezónní en. účinnost (%)	Index EEI	El. příkon Maximální (W)	El. příkon při spouštění (W)	El. příkon Provoz (W)	El. příkon Minimální (W)	El. příkon v stand by (W)	Ruční zapalování
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	ETA Heiztechnik	Rakousko	ETA-PU 15 kW	14,9				5		A++						95	66		
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	ETA Heiztechnik	Rakousko	ETA-PC 20 kW	20				5		A++						90	56		
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	ETA Heiztechnik	Rakousko	ETA-PC 25 kW	25				5		A+						101	60		
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	ETA Heiztechnik	Rakousko	ETA-PC 32 kW	32				5		A+						142	60		
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	ETA Heiztechnik	Rakousko	ETA-PC 40 kW	40				5		A+						150	70		
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	ETA Heiztechnik	Rakousko	ETA-PC 45 kW	45				5		A+						155	70		
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	ETA Heiztechnik	Rakousko	ETA-PC 50 kW	49,9				5		A+						160	75		
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	ETA Heiztechnik	Rakousko	ETA-PE-K 70 kW	70	93,1			5		A++						190	90		
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	ETA Heiztechnik	Rakousko	ETA-PE-K 90 kW	95	93			5								206	95		
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Fröling	Rakousko	P4 8	10,5												96			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Fröling	Rakousko	P4 15	14,9												123			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Fröling	Rakousko	P4 20	20												110			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Fröling	Rakousko	P4 25	25												110			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Fröling	Rakousko	P4 32	32												110			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Fröling	Rakousko	P4 38	38												110			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Fröling	Rakousko	P4 48	48												120			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Fröling	Rakousko	P4 60	58,8												120			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Fröling	Rakousko	P4 80	80												120			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Fröling	Rakousko	P4 100	100												120			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Fröling	Rakousko	T4 24	24												74			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Fröling	Rakousko	T4 30	30												84			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Fröling	Rakousko	T4 40	40												86			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Fröling	Rakousko	T4 50	50												88			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Fröling	Rakousko	T4 60	60												102			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Fröling	Rakousko	T4 75	75												122			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Fröling	Rakousko	T4 90	90												142			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Fröling	Rakousko	T4 100	99												156			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Galmet	Polsko	Genesis Plus KPP	10				5		A+				50					
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Galmet	Polsko	Genesis Plus KPP	15				5		A+				50					
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Galmet	Polsko	Genesis Plus KPP	20				5		A+				50					
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Galmet	Polsko	Genesis KPP	12,5				5		A				50					
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Galmet	Polsko	Genesis KPP	16				5		A+				50					
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Galmet	Polsko	Genesis KPP	24				5		A+				50					
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Galmet	Polsko	Genesis2 KPP 12	12				5		A				50					
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Guntamatic Heiztechnik GmbH	Rakousko												-	-	-	-	-	
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Hargassner	Rakousko												-	-	-	-	-	
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Herz	Rakousko												-	-	-	-	-	
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Kadria	Česká repulika												-	-	-	-	-	
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Kalor	Itálie	Kompakt 16	16,11	91,02			5		A++				350			110		
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Kalor	Itálie	Kompakt 20	19	92,13			5		A+				350			140		
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Kalor	Itálie	Kompakt 24	23,79	90,39			5		A+				350			140		
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Kalor	Itálie	Kompakt 28	17,17	90,09			5		A+				350			140		
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Kalor	Itálie	Kompakt 34	32	91,67			5		A++				350			140		
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Kolton	Polsko	Bio Pellmax	16												191	101		
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Kolton	Polsko	Bio Pellmax	20												191	101		

P2: Historický přehled vybraných termoelektrických generátorů a jejich parametrů /

Typ spal. zařízení	Typ kotle	Palivo	Výrobce	Země původu	Označení	Jm. výkon (kW)	Max. tepelná účinnost (%)	Teplota spalín při jm. výkonu (°C)	Teplota spalín při min. výkonu (°C)	Emisní třída	Ekodesign	Tř. energetické účinnosti	Užitečná účinnost při jm. výkonu (%)	Sezónní en. účinnost (%)	Index EEI	El. příkon Maximální (W)	El. příkon při spouštění (W)	El. příkon Provoz (W)	El. příkon Minimální (W)	El. příkon v stand by (W)	Ruční zapalování
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Kolton	Polsko	Bio Pellmax	25												191	101		
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Kolton	Polsko	Bio Pellmax	32												191	101		
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Kolton	Polsko	Pellduox	12												94	28		
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Kolton	Polsko	Pellduox	16												94	28		
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Kolton	Polsko	Pellduox	25												94	28		
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Kolton	Polsko	Pellduox	32												94	28		
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Kolton	Polsko	Pellduox	40												94	28		
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Kolton	Polsko	Pellduox	50												94	28		
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Ponast/Verner	Česká repulika	A251	25				5						1500		100			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Ponast/Verner	Česká repulika	A501	48				5											
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Ponast/Verner	Česká repulika	A302	30	94	130		5						1310	1310	130	72	18	
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Ponast/Verner	Česká repulika	A492	49	90,9	140		5						2500	2500	185	65	18	
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Ponast/Verner	Česká repulika	A602	60	89,3	155,2		5						2500	2500	185	65	18	
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Ponast	Česká repulika	KP 08	8	91,5	123,8	80,6	5						590	590	89		4	
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Ponast	Česká repulika	KP 11.1	14,9	90,8	126	79,4	5						1200	1200	173		4	
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Ponast	Česká repulika	KP 11	19	90,5	127	79	5						1200	1200	173		4	
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Ponast	Česká repulika	KP 21	28,5	90,9	134	101	5						1200	1200	193		4	
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Ponast	Česká repulika	KP 51.1	44,9	91,2	140,6	109,5	5						1200	1200	193		4	
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Ponast	Česká repulika	KP 51	49,2	91,2	141	110	5						1200	1200	193		4	
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Ponast	Česká repulika	KP 61	61	91,2	140	101	5						2400	2400	340		4	
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Ponast	Česká repulika	KP 82	80	90,1	147	99	5						2400	2400	400		4	
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Kovarson	Česká repulika	Gekon Pellet 20 kW	20	92	100	65,5	5	Ekodesign	A+	83,87	77,98	118	170		115	39	3	ANO
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Kovarson	Česká repulika	Gekon Pellet 25 kW	25	92	97	65,5	5	Ekodesign	A+	83,93	78	118	170		140	50	3	ANO
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Kovarson	Česká repulika	Panther P 20 kW	20,2				5	Ekodesign	A+	81,1	78,31	119			115	39	3	ANO
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Kovarson	Česká repulika	Panther P 25 kW	25				5	Ekodesign	A+	81,5	78,5	119			120	42	3	ANO
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Kovarson	Česká repulika	Panther P 30 kW	30						A+	81,7	78,8	120			135	45	3	ANO
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Kovarson	Česká repulika	Panther P 35 kW	36,6						A+	82,03	79,06	120			147	53	3	ANO
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Kovarson	Česká repulika	Tiger 20	20,7	83,4	157		3		A++	85,82	82,29	125			115	40	5	ANO
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Kovarson	Česká repulika	Tiger 25	25	83	155		3		A++	85,9	82,5	125			130	45	5	ANO
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Kovarson	Česká repulika	Tiger 30	30	82,6	152		3		A++	86	82,7	125			140	50	5	ANO
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Kovarson	Česká repulika	Tiger 35	34,8	82,2	150		3		A++	86,14	82,98	126			155	55	5	ANO
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Kovarson	Česká repulika	Tiger 40	40	82,2	150		3		A++	86	84	127			165	60	5	ANO
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Kovarson	Česká repulika	Tiger 48	48	82,1	150		3		A++	85,85	85	128			175	65	5	ANO
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Kovarson	Česká repulika	Tiger 55	57,1	82,1	150		3		A++	85,72	85,97	130			195	75	5	ANO
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Defro	Polsko	Due EkoPell 15	15				3		A+				376	376	76			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Defro	Polsko	Due EkoPell 20	20				3		A+				376	376	76			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Defro	Polsko	Due EkoPell 25	25				3		A+				376	376	76			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Defro	Polsko	Due EkoPell 35	35				3		A+				426	426	126			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Defro	Polsko	Due EkoPell 50	50				3		A+				426	426	126			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Defro	Polsko	Due EkoPell 75	75				3		A+				426	426	126			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Defro	Polsko	Duo Uni 15	15				3						873	873	123			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Defro	Polsko	Duo Uni 20	20				3						873	873	123			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Defro	Polsko	Duo Uni 25	25				3						873	873	123			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Defro	Polsko	Duo Uni 35	35				3						890	890	140			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Defro	Polsko	Duo Uni 50	50				3						890	890	140			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Defro	Polsko	Bio Slim 10	10				5		A+		76	112	412	412	112			

P2: Historický přehled vybraných termoelektrických generátorů a jejich parametrů /

Typ spal. zařízení	Typ kotle	Palivo	Výrobce	Země původu	Označení	Jm. výkon (kW)	Max. tepelná účinnost (%)	Teplota spalín při jm. výkonu (°C)	Teplota spalín při min. výkonu (°C)	Emisní třída	Ekodesign	Tř. energetické účinnosti	Užitečná účinnost při jm. výkonu (%)	Sezónní en. účinnost (%)	Index EEI	El. příkon Maximální (W)	El. příkon při spouštění (W)	El. příkon Provoz (W)	El. příkon Minimální (W)	El. příkon v stand by (W)	Ruční zapalování
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Defro	Polsko	Bio Slim 15	15				5		A+		77	115	412	412	112			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Defro	Polsko	Bio Slim 20	20				5		A+		78	115	412	412	112			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Defro	Polsko	Kompakt Ekopell 16	16				5		A+		80	118	412	412	112			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Defro	Polsko	Kompakt Ekopell 22	22				5		A+		79	117	412	412	112			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Defro	Polsko	Kompakt Ekopell 30	30				5		A+		79	117	487	487	187			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Defro	Polsko	Kompakt Ekopell 40	40				5		A+		81	119	487	487	187			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Defro	Polsko	Kompakt Ekopell 50	50				5		A+		82	120	515	515	215			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Defro	Polsko	Kompakt Ekopell 75	75				5		A+		69	101	563	563	263			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Defro	Polsko	Delta Ekopell 10	10				5		A+		76	110	376	376	76			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Defro	Polsko	Delta Ekopell 15	15				5		A+		73	108	376	376	76			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Defro	Polsko	Delta Ekopell 20	20				5		A+		78	109	376	376	76			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Defro	Polsko	Delta Ekopell 25	25				5		A+		78	109	376	376	76			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Defro	Polsko	Eko Slim 10	10				5		A+		76	112	412	412	112			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Defro	Polsko	Eko Slim 15	15				5		A+		77	115	412	412	112			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Defro	Polsko	Eko Slim 20	20				5		A+		78	115	412	412	112			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	SAS	Polsko	Bio Compact 10	10				5	Ekodesign	A+				820	820	220			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	SAS	Polsko	Bio Compact 12	12				5	Ekodesign	A+				820	820	220			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	SAS	Polsko	Bio Solid 14	14						A+					820	220			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	SAS	Polsko	Bio Solid 19	19						A+					820	220			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	SAS	Polsko	Bio Solid 25	25						A+					820	220			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	SAS	Polsko	Bio Solid 36	36						A+					820	220			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	SAS	Polsko	Bio Solid 48	48						A+					820	220			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Moderator	Polsko	Vento Bio	15												235			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Moderator	Polsko	Vento Bio	20												235			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Moderator	Polsko	Vento Bio	25												235			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Moderator	Polsko	Vento Bio	35												235			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Moderator	Polsko	Vento Bio	50												235			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Envo/Pereko	Polsko	KSP Spark	14	93,5	86	56		Ekodesign	A+		81	121			150			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Envo/Pereko	Polsko	KSP Spark	18	93	92	56		Ekodesign	A+		81	121			150			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Envo/Pereko	Polsko	KSP Spark	22	92,5	106	59		Ekodesign	A+		81	121			150			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Envo/Pereko	Polsko	KSP Spark	29	92,5	126	59		Ekodesign	A+		82	121			150			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Petrojet	Česká repulika	MultiBio 30 E	30	90	150		5								80			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Petrojet	Česká repulika	MultiBio 49	49,9	90	160		5								80			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Rojek	Česká repulika	KTP 20 Pellet	20	88	223			Ekodesign	A+		77		400	400	100			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Rojek	Česká repulika	KTP 25 Pellet	25	89	189			Ekodesign	A+		78		400	400	100			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Rojek	Česká repulika	KTP 30 Pellet	30	90	168			Ekodesign	A+		79		400	400	100			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Rojek	Česká repulika	TKA 15	15	88			5	Ekodesign	A+		77		110					Ano
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Rojek	Česká repulika	TKA 25	25	89			5	Ekodesign	A+		78		110					Ano
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Rojek	Česká repulika	TKA 45	45	89			5	Ekodesign	A+		78		110					Ano
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Rojek	Česká repulika	TKA 80	80	90			5	Ekodesign	A+		81		110					Ano
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Slovak	Česká repulika	SL22A	26				5	Ekodesign					175		80			Ano
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Slovak	Česká repulika	SL33A	31,9	87,3	227	85	4						175		80			Ano
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Windhager	Rakousko	BW 102	9,9	94,4					A+						28	16		
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Windhager	Rakousko	BW 152	15	93,8					A+						33	18		
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Windhager	Rakousko	BW 212	21	93,9					A+						41,2	19,6		

P2: Historický přehled vybraných termoelektrických generátorů a jejich parametrů /

Typ spal. zařízení	Typ kotle	Palivo	Výrobce	Země původu	Označení	Jm. výkon (kW)	Max. tepelná účinnost (%)	Teplota spalín při jm. výkonu (°C)	Teplota spalín při min. výkonu (°C)	Emisní třída	Ekodesign	Tř. energetické účinnosti	Užitečná účinnost při jm. výkonu (%)	Sezónní en. účinnost (%)	Index EEI	El. příkon Maximální (W)	El. příkon při spouštění (W)	El. příkon Provoz (W)	El. příkon Minimální (W)	El. příkon v stand by (W)	Ruční zapalování
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Windhager	Rakousko	BW 262	25,9	93,9					A+						48	21		
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Windhager	Rakousko	BW 332	32,5	94,8					A+						77	31		
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	ZK Design	Česká repulika	Volcano 20	16	91,3			4						110		70			
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Topmax	Česká repulika	EKO-BIO	15	90			5				88,4		970	970	80	30		
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Topmax	Česká repulika	EKO-BIO	20	90			5				88,5		970	970	100	35		
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Topmax	Česká repulika	EKO-BIO	25	90			5				88,7		970	970	140	40		
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Viessmann	Německo	Vitoligno 250-F	35	92,4	138		5		A+				1910		100	40		
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Viessmann	Německo	Vitoligno 250-F	52	92,3	136		5		A+				1910		200	50		
Kotle	Automatické	Dřevní pelety	Viessmann	Německo	Vitoligno 250-F	70	92,3	134		5		A+				1910		300	60		
Kotle	Automatické	Hn. uhlí	Agromechanika - Lhenice	Česká repulika	AM24	24	88			3								100			
Kotle	Automatické	Hn. uhlí	Agromechanika - Lhenice	Česká repulika	AM42	42	86			3								100			
Kotle	Automatické	Hn. uhlí	Agromechanika - Lhenice	Česká repulika	AM26 Carbo	26	87,3			4								100			
Kotle	Automatické	Hn. uhlí	Agromechanika - Lhenice	Česká repulika	AM26 Carbo2	24	90,1				Ekodesign							95			
Kotle	Automatické	Hn. uhlí	Agromechanika - Lhenice	Česká repulika	AM26 Combi	24,4	89,5											95			
Kotle	Automatické	Hn. uhlí	Benekov - Horní Benešov	Česká repulika	B 14	14	93,6	135		4								29	13	5	ANO
Kotle	Automatické	Hn. uhlí	Benekov - Horní Benešov	Česká repulika	B 20	19	92,9	130		4	Ekodesign					135		28	15	7	ANO
Kotle	Automatické	Hn. uhlí	Benekov - Horní Benešov	Česká repulika	C 17	19	92	94		4	Ekodesign	A+				135		28	15	7	ANO
Kotle	Automatické	Hn. uhlí	Benekov - Horní Benešov	Česká repulika	C 27	25	94	83		5	Ekodesign	A+				118		35	15	6	ANO
Kotle	Automatické	Hn. uhlí	Benekov - Horní Benešov	Česká repulika	C 37	35	93	101		4	Ekodesign					153		50	18	7	ANO
Kotle	Automatické	Hn. uhlí	Benekov - Horní Benešov	Česká repulika	C 57	49	93	126		4	Ekodesign					153		70	23	7	ANO
Kotle	Automatické	Hn. uhlí	Benekov - Horní Benešov	Česká repulika	C 100	99	88	160		4						320		71	26	10	ANO
Kotle	Automatické	Hn. uhlí	Dakon	Česká repulika	DOR 5N 25 Automat	25	92			4		B				145		45	15		
Kotle	Automatické	Hn. uhlí	Dakon	Česká repulika	DOR N 15 Automat	15	82 až 88			5	Ekodesign	A+				240		85	30		ANO
Kotle	Automatické	Hn. uhlí	Dakon	Česká repulika	DOR N 20 Automat	20	83 až 88			5	Ekodesign	A+				240		100	35		ANO
Kotle	Automatické	Hn. uhlí	Dakon	Česká repulika	DOR N 25 Automat	27	84 až 88			5	Ekodesign	A+				240		120	40		ANO
Kotle	Automatické	Hn. uhlí	Ekogalva	Česká repulika	Ekoscroll Alfa 19kW	19		147		5	Ekodesign	B				101					ANO
Kotle	Automatické	Hn. uhlí	Ekogalva	Česká repulika	Ekoscroll Alfa 25kW	25		148		5	Ekodesign	B				101					ANO
Kotle	Automatické	Hn. uhlí	Ekogalva	Česká repulika	Ekoscroll Alfa 28kW	28		149		5	Ekodesign	B				101					ANO
Kotle	Automatické	Hn. uhlí	Ekogalva	Česká repulika	Ekoscroll Alfa 32kW	32		150		5	Ekodesign	B				110					ANO
Kotle	Automatické	Hn. uhlí	Ekogalva	Česká repulika	Ekoscroll Alfa 38kW	38		162		5	Ekodesign	B				110					ANO
Kotle	Automatické	Hn. uhlí	Ekogalva	Česká repulika	Ekoscroll Alfa 42kW	42		164		5	Ne	B				110					ANO
Kotle	Automatické	Hn. uhlí	Ekogalva	Česká repulika	Ekoscroll Alfa 49kW	49		164		5	Ne	B				110					ANO
Kotle	Automatické	Hn. uhlí	Ekogalva	Česká repulika	Ekoscroll Alfa 60kW	60		163		4	Ne	B				245					ANO
Kotle	Automatické	Hn. uhlí	Ekogalva	Česká repulika	Ekoscroll Alfa 76kW	76		166		4	Ne					245					ANO
Kotle	Automatické	Hn. uhlí	Ekogalva	Česká repulika	Ekoscroll Ekonomíc 25kW	25		148		4	Ekodesign	B				101					ANO
Kotle	Automatické	Hn. uhlí	Ekogalva	Česká repulika	Ekoscroll Ekonomíc 32kW	32		150		4	Ne	B				110					ANO
Kotle	Automatické	Hn. uhlí	Ekogalva	Česká repulika	Ekoscroll Ekonomíc 40kW	40		164		4	Ne	B				110					ANO
Kotle	Automatické	Hn. uhlí	Ekogalva	Česká repulika	Ekoscroll Ekonomíc 49kW	49		164		4	Ne	B				110					ANO
Kotle	Automatické	Hn. uhlí	Ekogalva	Česká repulika	V8 Plus 26kW	26				3		C				240					
Kotle	Automatické	Hn. uhlí	Ekogalva	Česká repulika	V8 Plus 32kW	32				3		C				240					
Kotle	Automatické	Hn. uhlí	Ekogalva	Česká repulika	V8 Plus 38kW	38				3		C				264					
Kotle	Automatické	Hn. uhlí	Ekogalva	Česká repulika	V8 Plus 45kW	45				3		C				264					
Kotle	Automatické	Hn. uhlí	Viadrus (ZDB Group) - Bohumín	Česká repulika	A3C-S25	23	93,3	99	71	4		C		80	80	112		34	19	10	ANO
Kotle	Automatické	Hn. uhlí	Viadrus (ZDB Group) - Bohumín	Česká repulika	A3C-S31	28	85	180	100	4		C		80	80	112		34	19	10	ANO
Kotle	Automatické	Hn. uhlí	Viadrus (ZDB Group) - Bohumín	Česká repulika	A3C-S33	30	92	117	78	4		C		80	80	115		43	20	10	ANO
Kotle	Automatické	Hn. uhlí	Viadrus (ZDB Group) - Bohumín	Česká repulika	A3C-S35	35	89	160	90	4		C		80	80	115		43	20	10	ANO

P2: Historický přehled vybraných termoelektrických generátorů a jejich parametrů /

Typ spal. zařízení	Typ kotle	Palivo	Výrobce	Země původu	Označení	Jm. výkon (kW)	Max. tepelná účinnost (%)	Teplota spalín při jm. výkonu (°C)	Teplota spalín při min. výkonu (°C)	Emisní třída	Ekodesign	Tř. energetické účinnosti	Užitečná účinnost při jm. výkonu (%)	Sezónní en. účinnost (%)	Index EEI	El. příkon Maximální (W)	El. příkon při spouštění (W)	El. příkon Provoz (W)	El. příkon Minimální (W)	El. příkon v stand by (W)	Ruční zapalování
Kotle	Automatické	Hn. uhlí	Viadrus (ZDB Group) - Bohumín	Česká repulika	Hercules Duo - 4 čl.	21	83,1	195	115	4		D		73	74	105		25	16	10	ANO
Kotle	Automatické	Hn. uhlí	Viadrus (ZDB Group) - Bohumín	Česká repulika	Hercules Duo - 5 čl.	25	85	180	100	4		C		75	76	105		25	16	10	ANO
Kotle	Automatické	Hn. uhlí	Viadrus (ZDB Group) - Bohumín	Česká repulika	Hercules Duo - 6 čl.	30	87	170	95	4		C		77	77	105		46	21	10	ANO
Kotle	Automatické	Hn. uhlí	Viadrus (ZDB Group) - Bohumín	Česká repulika	Hercules Duo - 7 čl.	35	87,1	160	90	4		C		79	79	105		46	21	10	ANO
Kotle	Automatické	Hn. uhlí	Viadrus (ZDB Group) - Bohumín	Česká repulika	A3W-S25PB	25	91	150	85	5		C		79	79	105		25	16	10	ANO
Kotle	Automatické	Hn. uhlí	Viadrus (ZDB Group) - Bohumín	Česká repulika	A3W-S25B	25	91	150	85	5		C		79	79	105		39	20	10	ANO
Kotle	Automatické	Hn. uhlí	Viadrus (ZDB Group) - Bohumín	Česká repulika	Vulcanus - 4 čl.	21	83,1	195	115	4		D		73	74	105		25	16	10	ANO
Kotle	Automatické	Hn. uhlí	Viadrus (ZDB Group) - Bohumín	Česká repulika	Vulcanus - 5 čl.	25	85	180	100	4		C		75	76	105		25	16	10	ANO
Kotle	Automatické	Hn. uhlí	Viadrus (ZDB Group) - Bohumín	Česká repulika	Vulcanus - 6 čl.	30	87	170	95	4		C		77	77	105		46	21	10	ANO
Kotle	Automatické	Hn. uhlí	Viadrus (ZDB Group) - Bohumín	Česká repulika	Vulcanus - 7 čl.	35	87,1	160	90	4		C		79	79	105		46	21	10	ANO
Kotle	Automatické	Hn. uhlí	Elektromet	Polsko	Eko-KWP V+ 17	17	93			5				84	123						
Kotle	Automatické	Hn. uhlí	Elektromet	Polsko	Eko-KWP V+ 25	25	93			5				86	126						
Kotle	Automatické	Hn. uhlí	Elektromet	Polsko	Eko-KWP V+ 34	34	93			5				86	127						
Kotle	Automatické	Hn. uhlí	Kovarson	Česká repulika	Gekon 20 kW	20	95,5	107	65,5	5	Ekodesign					170		60			ANO
Kotle	Automatické	Hn. uhlí	Kovarson	Česká repulika	Gekon 25 kW	25	91,2	129	65,5	5	Ekodesign					170		60			ANO
Kotle	Automatické	Hn. uhlí	Kovarson	Česká repulika	Panther 20 kW	22,86	84	165	87,2	4		D	78,81	69,39	73	170		120	50	3	ANO
Kotle	Automatické	Hn. uhlí	Kovarson	Česká repulika	Panther 25 kW	25	83,6	160	83	4		D	79	69,5	73	170		130	50	3	ANO
Kotle	Automatické	Hn. uhlí	Kovarson	Česká repulika	Panther 30 kW	30	83,1	155	81	4		D	79,5	70	74	170		140	52	3	ANO
Kotle	Automatické	Hn. uhlí	Kovarson	Česká repulika	Panther 35 kW	33,88	81,4	150	80,3	4		D	80,22	70,06	74	170		155	55	3	ANO
Kotle	Automatické	Hn. uhlí	Kovarson	Česká repulika	Tiger 20	20	79,9	182		3		A++						115	40	5	ANO
Kotle	Automatické	Hn. uhlí	Kovarson	Česká repulika	Tiger 25	25	79,5	172		3		A++						130	45	5	ANO
Kotle	Automatické	Hn. uhlí	Kovarson	Česká repulika	Tiger 30	30	79,2	166		3		A++						140	50	5	ANO
Kotle	Automatické	Hn. uhlí	Kovarson	Česká repulika	Tiger 35	35	78,8	157		3		A++						155	55	5	ANO
Kotle	Automatické	Hn. uhlí	Kovarson	Česká repulika	Tiger 40	40	78,5	163		3		A++						165	60	5	ANO
Kotle	Automatické	Hn. uhlí	Kovarson	Česká repulika	Tiger 48	48	78,3	169		3		A++						175	65	5	ANO
Kotle	Automatické	Hn. uhlí	Kovarson	Česká repulika	Tiger 55	55	78,1	175		3		A++						195	75	5	ANO
Kotle	Automatické	Hn. uhlí	Rojek	Česká repulika	TKA 15	15	89			4	Ekodesign	C		77		110					Ano
Kotle	Automatické	Hn. uhlí	Rojek	Česká repulika	TKA 25	25	90			4	Ekodesign	C		79		110					Ano
Kotle	Automatické	Hn. uhlí	Rojek	Česká repulika	TKA 45	45	83			4	Ekodesign	C		78		110					Ano
Kotle	Automatické	Hn. uhlí	Rojek	Česká repulika	TKA 80	78	86			4	Ekodesign	C		79		110					Ano
Kotle	Automatické	Hn. uhlí	Slovak	Česká repulika	SL27-4					4			79,7	77	77	0	0	0	0	0	Ano
Kotle	Automatické	Hn. uhlí	Slovak	Česká repulika	SL33-4					4				76	76	0	0	0	0	0	Ano
Kotle	Automatické	Hn. uhlí	ZK Design	Česká repulika	Vollcano 20	17				4						110		70			
Kotle	Automatické	Černé uhlí	Galmet	Polsko	EKO-GT KWP	17				4		D		72	72	190					
Kotle	Automatické	Černé uhlí	Galmet	Polsko	KWP 12	12						C				190					
Kotle	Automatické	Černé uhlí	Galmet	Polsko	KWP 17	17						C				190					
Kotle	Automatické	Černé uhlí	Galmet	Polsko	KWP 25	25						C				190					
Kotle	Automatické	Černé uhlí	Galmet	Polsko	KWP 30	30						C				235					
Kotle	Automatické	Černé uhlí	Galmet	Polsko	KWP 40	40						C				235					
Kotle	Automatické	Černé uhlí	Galmet	Polsko	KWP 50	50						C				235					
Kotle	Automatické	Černé uhlí	Galmet	Polsko	KWP 60	60						C				255					
Kotle	Automatické	Černé uhlí	Galmet	Polsko	KWP 75	75						C				570					
Kotle	Automatické	Černé uhlí	Galmet	Polsko	KWP 700	100						C				570					
Kotle	Automatické	Černé uhlí	Galmet	Polsko	Galaxia KWE 15	15				5						257					
Kotle	Automatické	Černé uhlí	Galmet	Polsko	Galaxia KWE 18	18				5						257					

P2: Historický přehled vybraných termoelektrických generátorů a jejich parametrů /

Typ spal. zařízení	Typ kotle	Palivo	Výrobce	Země původu	Označení	Jm. výkon (kW)	Max. tepelná účinnost (%)	Teplota spalín při jm. výkonu (°C)	Teplota spalín při min. výkonu (°C)	Emisní třída	Ekodesign	Tř. energetické účinnosti	Užitečná účinnost při jm. výkonu (%)	Sezónní en. účinnost (%)	Index EEI	El. příkon Maximální (W)	El. příkon při spouštění (W)	El. příkon Provoz (W)	El. příkon Minimální (W)	El. příkon v stand by (W)	Ruční zapalování
Kotle	Automatické	Černé uhlí	Galmet	Polsko	Galaxia KWE 22	22				5						354					
Kotle	Automatické	Černé uhlí	Kolton	Polsko	Matix	17												184	94		
Kotle	Automatické	Černé uhlí	Kolton	Polsko	Matix	30												184	94		
Kotle	Automatické	Černé uhlí	Kolton	Polsko	Matix	40												184	94		
Kotle	Automatické	Černé uhlí	Kolton	Polsko	Matix	50												184	94		
Kotle	Automatické	Černé uhlí	Kolton	Polsko	Matix	60												184	94		
Kotle	Automatické	Černé uhlí	Kolton	Polsko	Ecomatix	19				5								184	94		
Kotle	Automatické	Černé uhlí	Kolton	Polsko	Ecomatix	30												184	94		
Kotle	Automatické	Černé uhlí	Kolton	Polsko	Ecomatix	40												184	94		
Kotle	Automatické	Černé uhlí	Kolton	Polsko	Ecomatix	50												184	94		
Kotle	Automatické	Černé uhlí	Kolton	Polsko	Ecomatix	60												184	94		
Kotle	Automatické	Černé uhlí	Defro	Polsko	Sigma Uni 16	16				5		B		83		873	873	123			
Kotle	Automatické	Černé uhlí	Defro	Polsko	Sigma Uni 20	20				5		B		82		873	873	123			
Kotle	Automatické	Černé uhlí	Defro	Polsko	Sigma Uni 24	24				5		C		75		873	873	123			
Kotle	Automatické	Černé uhlí	Defro	Polsko	Sigma Uni 36	36				5		C		80		890	890	140			
Kotle	Automatické	Černé uhlí	Defro	Polsko	Sigma Uni 48	48				5		B		83		890	890	140			
Kotle	Automatické	Černé uhlí	SAS	Polsko	Solid 14	14				5		B						180			ANO
Kotle	Automatické	Černé uhlí	SAS	Polsko	Solid 19	19				5		B						180			ANO
Kotle	Automatické	Černé uhlí	SAS	Polsko	Solid 25	25				5		B						180			ANO
Kotle	Automatické	Černé uhlí	SAS	Polsko	Solid 36	36				5		B						180			ANO
Kotle	Automatické	Černé uhlí	SAS	Polsko	Solid 48	48				5		B						180			ANO
Kotle	Automatické	Černé uhlí	SAS	Polsko	Efekt 14	14				5		C						180			ANO
Kotle	Automatické	Černé uhlí	SAS	Polsko	Efekt 17	17				5		C						180			ANO
Kotle	Automatické	Černé uhlí	SAS	Polsko	Efekt 23	23				5		C						180			ANO
Kotle	Automatické	Černé uhlí	SAS	Polsko	Efekt 29	29				5		C						180			ANO
Kotle	Automatické	Černé uhlí	SAS	Polsko	Efekt 36	36				5		B						180			ANO
Kotle	Automatické	Černé uhlí	SAS	Polsko	Efekt 42	42				5		B						180			ANO
Kotle	Automatické	Černé uhlí	SAS	Polsko	Efekt 46	46				5		B						180			ANO
Kotle	Prohořivací	Dřevní pelety	Dakon	Česká repulika	FB2 25	24	80	180 až 210		3						200	55	100	35	5	ANO
Kotle	Prohořivací	Dřevní pelety	Dakon	Česká repulika	FB2 35	30	80			3						200	75	110	45	5	ANO
Kotle	Odhořivací	Kusové dřevo	Dakon	Česká repulika	DOR F 32 D	28				3											
Kotle	Odhořivací	Hn. Uhlí	Dakon	Česká repulika	DOR F 12					3											
Kotle	Odhořivací	Hn. Uhlí	Dakon	Česká repulika	DOR F 16					3											
Kotle	Odhořivací	Hn. Uhlí	Dakon	Česká repulika	DOR F 20					3											
Kotle	Odhořivací	Hn. Uhlí	Dakon	Česká repulika	DOR F 24					3											
Kotle	Odhořivací	Hn. Uhlí	Dakon	Česká repulika	DOR F 25 MAX					3											
Kotle	Odhořivací	Hn. Uhlí	Dakon	Česká repulika	DOR F 32					3											
Kotle	Odhořivací	Hn. Uhlí	Dakon	Česká repulika	DOR 4F 14	14	88			4	Ekodesign					-	-	-	-	-	
Kotle	Odhořivací	Hn. Uhlí	Dakon	Česká repulika	DOR 4F 18	18	88			4	Ekodesign					-	-	-	-	-	
Kotle	Odhořivací	Hn. Uhlí	Dakon	Česká repulika	DOR 4F 24	24	87			4	Ekodesign					-	-	-	-	-	
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Atmos - Bělá pod Bezdězem	Česká repulika	DC18GD	19	90,3	145		5	Ekodesign	A+		80	117		-	-			
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Atmos - Bělá pod Bezdězem	Česká repulika	DC25GD	25	90,5	132		5	Ekodesign	A+		79	115		-	-			
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Atmos - Bělá pod Bezdězem	Česká repulika	DC30GD	29,8	90,8	155		5	Ekodesign	A+		79	116		-	-			
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Atmos - Bělá pod Bezdězem	Česká repulika	DC40GD	40	90,5	175		5	Ekodesign	A+		79	116		-	-			
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Atmos - Bělá pod Bezdězem	Česká repulika	DC50GD	49	92	183		5	Ekodesign	A+		80	117		-	-			
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Agromechanika - Lhenice	Česká repulika	AM23	23	82-88	-		-		-					-	55			

P2: Historický přehled vybraných termoelektrických generátorů a jejich parametrů /

Typ spal. zařízení	Typ kotle	Palivo	Výrobce	Země původu	Označení	Jm. výkon (kW)	Max. tepelná účinnost (%)	Teplota spalín při jm. výkonu (°C)	Teplota spalín při min. výkonu (°C)	Emisní třída	Ekodesign	Tř. energetické účinnosti	Užitečná účinnost při jm. výkonu (%)	Sezónní en. účinnost (%)	Index EEI	El. příkon Maximální (W)	El. příkon při spouštění (W)	El. příkon Provoz (W)	El. příkon Minimální (W)	El. příkon v stand by (W)	Ruční zapalování
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Agromechanika - Lhenice	Česká repulika	AM29	29	82-89	-	-	-		-					-	41			
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Agromechanika - Lhenice	Česká repulika	AM43	43	82-90	-	-	-		-					-	83			
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Benekov - Horní Benešov	Česká repulika	D 12	12	92	135		5	Ekodesign	A+						38		2	ANO
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Benekov - Horní Benešov	Česká repulika	D 18	18	92	135		5	Ekodesign	A+						40		2	ANO
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Benekov - Horní Benešov	Česká repulika	D 26	25	92	135		5	Ekodesign	A+						40		2	ANO
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Benekov - Horní Benešov	Česká repulika	D 33	33	91	145		5	Ekodesign	A+						45		2	ANO
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Attack	Slovensko	AWP 25	25	90,2	156		5		A+				530	360	90	32	15	
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Attack	Slovensko	DP 25 Standard	25	85,3	230		3								50			
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Attack	Slovensko	DP 35 Standard	35	85,3	225		3								50			
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Attack	Slovensko	DP 45 Standard	45	86 (77,6)	220		3				74	109			60			
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Attack	Slovensko	DP 75 Standard	75	86	262										60			
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Attack	Slovensko	DP 95 Standard	95	81	287										90			
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Centrometal Tehnika Grijanja	Chorvatsko	BioTec Plus 25	25		90 až 170		5		A+				1100		110	60	5	
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Centrometal Tehnika Grijanja	Chorvatsko	BioTec Plus 29	29		91 až 170		5		A+				1100		112	63	5	
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Centrometal Tehnika Grijanja	Chorvatsko	BioTec Plus 31	31		92 až 170		5		A+				1100		114	65	5	
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Centrometal Tehnika Grijanja	Chorvatsko	BioTec Plus 35	35		93 až 170		5		A+				1100		116	68	5	
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Centrometal Tehnika Grijanja	Chorvatsko	BioTec Plus 45	45		94 až 170		5		A+				1100		122	75	5	
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Centrometal Tehnika Grijanja	Chorvatsko	BioTec 25	25		170		3		A+				250					
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Centrometal Tehnika Grijanja	Chorvatsko	BioTec 35	35		190		3		A+				250					
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Centrometal Tehnika Grijanja	Chorvatsko	BioTec 45	45		180		3		A+				250					
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Centrometal Tehnika Grijanja	Chorvatsko	BioTec-L 25	25		140		5		A+				135		110	60	5	
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Centrometal Tehnika Grijanja	Chorvatsko	BioTec-L 34	34		140		5		A+				135		116	67,5	5	
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Centrometal Tehnika Grijanja	Chorvatsko	BioTec-L 45	45		140		5		A+				135		122	75	5	
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Dakon	Česká repulika	SP Pyro 18	18	89			5		A+	81,1	78	113	90		80	0	5	ANO
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Dakon	Česká repulika	SP Pyro 24	24	89			5		A+				90		80	0	5	ANO
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Dakon	Česká repulika	NP Pyro 22	22	87			4		A+	80,5	77	112	80		80	0	5	ANO
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Dakon	Česká repulika	NP Pyro 30	30	87			4		A+	80,4	77	112	80		80	0	5	ANO
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Dakon	Česká repulika	NP Pyro 40	40	88			4		A+	81	78	113	80		80	0	5	ANO
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Dakon	Česká repulika	NP Pyro 50	50	89			5		A+	82,4	79	115	80		80	0	5	ANO
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Viadrus (ZDB Group) - Bohumín	Česká repulika	Lignator - 5 čl.	14	86,6	160		3		A+		75	113			53			ANO
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Viadrus (ZDB Group) - Bohumín	Česká repulika	Lignator - 6 čl.	18	89,6	160		3		A+		78	117			53			ANO
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Viadrus (ZDB Group) - Bohumín	Česká repulika	Lignator - 7 čl.	23	89,4	160		5		A+		77	113			53			ANO
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Viadrus (ZDB Group) - Bohumín	Česká repulika	Lignator - 8 čl.	26	87,7	160		4		A+		77	114			53			ANO
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Viadrus (ZDB Group) - Bohumín	Česká repulika	Lignator - 9 čl.	30	87,1	160		3		A+		77	113			53			ANO
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Viadrus (ZDB Group) - Bohumín	Česká repulika	Lignator - 10 čl.	34	87,9	160		3		A+		77	114			53			ANO
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Viadrus (ZDB Group) - Bohumín	Česká repulika	P7C-S22D	22	91,4	141		5		A+		80	118			60		4	ANO
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Viadrus (ZDB Group) - Bohumín	Česká repulika	P7C-S30D	30	90,5	145,5		5		A+		78	115			60		4	ANO
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Viadrus (ZDB Group) - Bohumín	Česká repulika	P7C-S38D	38	89,1	161		5		A+		78	115			60		4	ANO
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Viadrus (ZDB Group) - Bohumín	Česká repulika	Hercules U32 - 5 čl.	15	88,9	170	130	3		A+		79	116			0			ANO
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Viadrus (ZDB Group) - Bohumín	Česká repulika	Hercules U32 - 6 čl.	19	88,3	170	130	3		A+		78	115			0			ANO
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Viadrus (ZDB Group) - Bohumín	Česká repulika	Hercules U32 - 7 čl.	22	88	170	130	3		A+		78	114			0			ANO
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	ETA Heiztechnik	Rakousko	ETA-SH 20 kW	20	95,4					A+		79	116			69			ANO
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	ETA Heiztechnik	Rakousko	ETA-SH 30 kW	30	92,7					A+		77	114			86			ANO
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	ETA Heiztechnik	Rakousko	ETA-SH 40 kW	40	93,6					A+		78	115			87			ANO
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	ETA Heiztechnik	Rakousko	ETA-SH 50 kW	49,9	93,6					A+		79	117			87			ANO

P2: Historický přehled vybraných termoelektrických generátorů a jejich parametrů /

Typ spal. zařízení	Typ kotle	Palivo	Výrobce	Země původu	Označení	Jm. výkon (kW)	Max. tepelná účinnost (%)	Teplota spalín při jm. výkonu (°C)	Teplota spalín při min. výkonu (°C)	Emisní třída	Ekodesign	Tř. energetické účinnosti	Užitečná účinnost při jm. výkonu (%)	Sezónní en. účinnost (%)	Index EEI	El. příkon Maximální (W)	El. příkon při spouštění (W)	El. příkon Provoz (W)	El. příkon Minimální (W)	El. příkon v stand by (W)	Ruční zapalování
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	ETA Heiztechnik	Rakousko	ETA-SH 60 kW	60	93,6					A+		80	117			87			ANO
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Fröling	Rakousko	S1 Turbo 15	15						A+						37			
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Fröling	Rakousko	S1 Turbo 20	20						A+						42			
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Fröling	Rakousko	S4 Turbo 15	15	92,3											105			
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Fröling	Rakousko	S4 Turbo 22	22	92,7											105			
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Fröling	Rakousko	S4 Turbo 28	28	92,8											125			
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Fröling	Rakousko	S4 Turbo 34	34	92,9											110			
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Fröling	Rakousko	S4 Turbo 40	40	93											110			
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Fröling	Rakousko	S4 Turbo 50	50	94											140			
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Fröling	Rakousko	S4 Turbo 60	60	94,9											140			
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Guntamatic Heiztechnik GmbH	Rakousko	BMK	20						A+				-	-	-	-	-	
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Guntamatic Heiztechnik GmbH	Rakousko	BMK	30						A+				-	-	-	-	-	
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Guntamatic Heiztechnik GmbH	Rakousko	BMK	40,3						A+				-	-	-	-	-	
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Guntamatic Heiztechnik GmbH	Rakousko	BMK	50						A+				-	-	-	-	-	
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Guntamatic Heiztechnik GmbH	Rakousko	Biosmart	14						A+				-	-	-	-	-	
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Guntamatic Heiztechnik GmbH	Rakousko	Biosmart	22						A+				-	-	-	-	-	
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Guntamatic Heiztechnik GmbH	Rakousko	Bio-hybrid 0.10	14						A++				-	-	-	-	-	
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Guntamatic Heiztechnik GmbH	Rakousko	Bio-hybrid 0.16	14						A+				-	-	-	-	-	
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Kalor	Itálie	Pirolitika	25		140				A+				-	-	-	-	-	
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Kalor	Itálie	Pirolitika	31		140				A+				-	-	-	-	-	
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Kalor	Itálie	Pirolitika	45		140				A+				-	-	-	-	-	
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Ponast/Verner	Česká repulika	V210	20	90	170		5								35			ANO
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Ponast/Verner	Česká repulika	V140	14	90			5								36			ANO
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Kovarson	Česká repulika	Makak Lambda 25	24,7	91,1			5		A+	84,48	81,48	123	60		64		5	ANO
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Kovarson	Česká repulika	Makak Lambda 30	30	90,5			5		A+	83,9	80,9	122	60		18		4	ANO
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Kovarson	Česká repulika	Makak Lambda 35	35	90			5		A+	83,3	80,3	122	60		18		4	ANO
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Kovarson	Česká repulika	Makak Lambda 40	40,8	89,4			5		A+	82,67	79,67	121	60		18		4	ANO
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Kovarson	Česká repulika	Makak 20	20,64				4		A+	79,81	76,81	117	60		18		4	ANO
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Kovarson	Česká repulika	Makak 25	25				5		A+	80,6	77,6	118	60		22		4	ANO
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Kovarson	Česká repulika	Makak 30	30				5		A+	81,39	78,39	119	60		27		4	ANO
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Kovarson	Česká repulika	Makak 35	35				5		A+	82,18	79,18	120	60		31		4	ANO
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Kovarson	Česká repulika	Makak 40	40,8				5		A+	84,48	81,48	121	60		36		4	ANO
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Defro	Polsko	HG 25	23	90			5		A+		79	116			80			ANO
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Defro	Polsko	HG 40	40	90			5		A+		80	117			162			ANO
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Opop	Česká repulika	Ecomax 30	29,3				4		A+		77	112	312		44			
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Opop	Česká repulika	Ecomax 40	38,4				4		A+		78	113	312		44			
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Opop	Česká repulika	Ecomax 50	46,49				5		A+		79	115	312		44			
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Rojek	Česká repulika	Rojek PK 20	20				5	Ekodesign	A+		79				76			ANO
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Rojek	Česká repulika	Rojek PK 25	25				5	Ekodesign	A+		78				76			ANO
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Rojek	Česká repulika	Rojek PK 30	32				5	Ekodesign	A+		78				76			ANO
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Rojek	Česká repulika	Rojek PK 40	36				4	Ekodesign	A+		78				76			ANO
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Rojek	Česká repulika	Rojek PK 49	43				4	Ekodesign	A+		78				76			ANO
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Rojek	Česká repulika	Rojek PK 60	50				4	Ekodesign	A+		78				76			ANO
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Rojek	Česká repulika	Rojek PK BIO 20	20				5	Ekodesign	A+		79				76			ANO
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Rojek	Česká repulika	Rojek PK BIO 25	25				5	Ekodesign	A+		78				76			ANO
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Rojek	Česká repulika	Rojek PK BIO 30	32				5	Ekodesign	A+		77				76			ANO

P2: Historický přehled vybraných termoelektrických generátorů a jejich parametrů /

Typ spal. zařízení	Typ kotle	Palivo	Výrobce	Země původu	Osazení	Jm. výkon (kW)	Max. tepelná účinnost (%)	Teplota spalín při jm. výkonu (°C)	Teplota spalín při min. výkonu (°C)	Emisní třída	Ekodesign	Tř. energetické účinnosti	Užitečná účinnost při jm. výkonu (%)	Sezónní en. účinnost (%)	Index EEI	El. příkon Maximální (W)	El. příkon při spouštění (W)	El. příkon Provoz (W)	El. příkon Minimální (W)	El. příkon v stand by (W)	Ruční zapalování
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Slovak	Česká repulika	Pyro Therm	15	89,5	130		5	Ekodesign	A+	82,3	79	116			30	-		ANO
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Slovak	Česká repulika	Pyro Therm	20	89	168		5	Ekodesign	A+	81	78	114			30	-		ANO
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Slovak	Česká repulika	Pyro Therm	25	89,7	145		5		A+	81,5	78	115			30	-		ANO
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Slovak	Česká repulika	Pyro Therm	30	89,2	157		5	Ekodesign	A+	81,1	78	114			30			ANO
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Viessmann	Německo	Vitoligno 150-S	17				5								34			
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Viessmann	Německo	Vitoligno 150-S	23				5								38			
Kotle	Zplyňovací	Kusové dřevo	Viessmann	Německo	Vitoligno 150-S	30				5								54			
Kotle	Zplyňovací	Hn. uhlí	Atmos - Bělá pod Bezdězem	Česká repulika	C18S	20	88,9	169		5		C						50			
Kotle	Zplyňovací	Hn. uhlí	Atmos - Bělá pod Bezdězem	Česká repulika	C25ST	25	88,9	164		5		C						50			
Kotle	Zplyňovací	Hn. uhlí	Atmos - Bělá pod Bezdězem	Česká repulika	C32ST	32	88,6	181		5		C						50			
Kotle	Zplyňovací	Hn. uhlí	Atmos - Bělá pod Bezdězem	Česká repulika	C40S	40	85,4	225		4		C						50			
Kotle	Zplyňovací	Hn. uhlí	Atmos - Bělá pod Bezdězem	Česká repulika	C50S	48	83,4	230		4		C						50			
Kotle	Zplyňovací	Hn. uhlí	Viadrus (ZDB Group) - Bohumín	Česká repulika	Hercules U32 - 5 čl.	14	89,9	170	130	5		B		82	82	0	0	0	0	0	ANO
Kotle	Zplyňovací	Hn. uhlí	Viadrus (ZDB Group) - Bohumín	Česká repulika	Hercules U32 - 6 čl.	19	86,5	170	130	4		C		79	79	0	0	0	0	0	ANO
Kotle	Zplyňovací	Hn. uhlí	Viadrus (ZDB Group) - Bohumín	Česká repulika	Hercules U32 - 7 čl.	21	90,1	170	130	5		B		82	82	0	0	0	0	0	ANO
Kotle	Zplyňovací	Hn. uhlí	Rojek	Česká repulika	Rojek PK U 20	21,5				4		C		77				76			ANO
Kotle	Zplyňovací	Hn. uhlí	Rojek	Česká repulika	Rojek PK U 25	25				4		C		77				76			ANO
Kotle	Zplyňovací	Hn. uhlí	Rojek	Česká repulika	Rojek PK U 30	38				4		C		77				76			ANO
Kotle	Zplyňovací	Hn. uhlí	Rojek	Česká repulika	Rojek PK 40	40				4		C		79				76			ANO
Kotle	Zplyňovací	Hn. uhlí	Rojek	Česká repulika	Rojek PK 49	49				4		C		81				76			ANO
Kotle	Zplyňovací	Hn. uhlí	Rojek	Česká repulika	Rojek PK 60	60				4		B		83				76			ANO
Kotle	Zplyňovací	Hn. uhlí	Slovak	Česká repulika	Variant SL18D	18				4		C				0	0	0	0	0	ANO
Kotle	Zplyňovací	Hn. uhlí	Slovak	Česká repulika	Variant SL23D	23				4		C				0	0	0	0	0	ANO
Kotle	Zplyňovací	Hn. uhlí	Slovak	Česká repulika	Variant SL27D	27				4		C				0	0	0	0	0	ANO
Kotle	Zplyňovací	Hn. uhlí	Slovak	Česká repulika	Variant SL27-4	27	84	190		4		C				0	0	0	0	0	ANO
Kotle	Zplyňovací	Hn. uhlí	Slovak	Česká repulika	Variant SL33-4	33	85,4	200		4		C				0	0	0	0	0	ANO
Kotle	Zplyňovací	Hn. uhlí	Slovak	Česká repulika	Variant SL34D	34				4		C				0	0	0	0	0	ANO
Kotle	Zplyňovací	Hn. uhlí	Slovak	Česká repulika	Variant SL39D	39				4		C				0	0	0	0	0	ANO
Kotle	Zplyňovací	Černé uhlí	Viadrus (ZDB Group) - Bohumín	Česká repulika	Hercules U32 - 5 čl.	15	89,6	170	130	5		C		83	83	0	0	0	0	0	ANO
Kotle	Zplyňovací	Černé uhlí	Viadrus (ZDB Group) - Bohumín	Česká repulika	Hercules U32 - 6 čl.	21	88,6	170	130	5		C		82	82	0	0	0	0	0	ANO
Kotle	Zplyňovací	Černé uhlí	Viadrus (ZDB Group) - Bohumín	Česká repulika	Hercules U32 - 7 čl.	25	89,4	170	130	5		C		82	82	0	0	0	0	0	ANO
Kotle	S atm. hořákem	Plyn	Viadrus (ZDB Group) - Bohumín	Česká repulika	G42ECO2Z010TH	8	90,93							77		110		7	2	0	
Kotle	S atm. hořákem	Plyn	Viadrus (ZDB Group) - Bohumín	Česká repulika	G42ECO3Z020TH	17	91,49							79		110		10	3	0	
Kotle	S atm. hořákem	Plyn	Viadrus (ZDB Group) - Bohumín	Česká repulika	G42ECO4Z020TH	26	90,87							79		110		10	3	0	
Kotle	S atm. hořákem	Plyn	Viadrus (ZDB Group) - Bohumín	Česká repulika	G42ECO5Z020TH	30	91,38							79		110		10	3	0	
Kotle	Kondenzační	Plyn	Viadrus (ZDB Group) - Bohumín	Česká repulika	K4G1H24Z	24		30 až 85				A		90		110		20	11	3	
Kotle	Kondenzační	Plyn	Viadrus (ZDB Group) - Bohumín	Česká repulika	K4G1H33Z	33		30 až 85				A		90		110		11	4	3	
Kotle	Kondenzační	Plyn	Viadrus (ZDB Group) - Bohumín	Česká repulika	K5D4L20	20		30 až 85				A		93		110		69	30	3	
Kotle	Kondenzační	Plyn	Viadrus (ZDB Group) - Bohumín	Česká repulika	K2 L3X	22,7		31 až 85				A		92		110		34	13	3	

P3: Přehled vybraných oběhových čerpadel a přehled jejich parametrů

Tab. P3 Parametry nízkopříkonových mokroběžných čerpadel¹⁰

Výrobce / Prodejce	Označení čerpadla	PN	Teplotní třída TF	Ext. řízení čerpadla	Typ	DN	Eta max (%)	Energetická třída	EEI s	Napájecí napětí	Dopravní výška max. (m)	Obj. průtok max. (m³/h)	Proporciální tlak	Konst. tlak	Konst. ot.	Autoadapt	Příkon min. (W)	Příkon max. (W)
Aquacup																		
Askoll	ES2				60	25			0,20	230 V AC	6	3,50	PP	CP	CS	-	3	42
Askoll	ES2				70	25			0,21	230 V AC	7	4,20	PP	CP	CS	-	3	56
Askoll	ES2 C				60	25			0,21	230 V AC	6	3,40	PP	CP	CS	-	3	42
Askoll	ES2 C				70	25			0,21	230 V AC	6	3,40	PP	CP	CS	-	3	42
Askoll	ES2 Solar				60	25			0,20	230 V AC	6	3,50	PP	-	CS	-	3	42
Askoll	ES2 Adapt				60	25			0,20	230 V AC	6	3,50	PP	CP	CS	A	3	42
Askoll	ES2 Adapt				70	25			0,21	230 V AC	7	4,20	PP	CP	CS	A	3	56
Askoll	ES C A				60				0,27	230 V AC	5,9	2,40	PP	-	CS	-	10	51
Askoll	ES Maxi				60				0,23	230 V AC	5,5	7,60	PP	CP	CS	-	8	100
Dambat (IBO)	Beta				25-40	25			0,23	230 V AC	4	2,40	PP	CP	CS	A	5	22
Dambat (IBO)	Beta				25-60	25			0,23	230 V AC	6	3,10	PP	CP	CS	A	5	45
Biral	PrimAX				25-3 180 RED	25			0,15	230 V AC	3	2,90					2	15
Biral	PrimAX				25-4 180 RED	25			0,16	230 V AC	4	3,10					3	18
Biral	PrimAX				25-6 180 RED	25			0,17	230 V AC	6	3,90					3	34
Biral	PrimAX				25-8 180 RED	25			0,18	230 V AC	7,5	4,50					3	50
Biral	ModulA				25-4 180 RED	25			0,19	230 V AC	4						11	52
Biral	ModulA				25-6 180 RED	25			0,19	230 V AC	6						12	86
Biral	ModulA				25-8 180 RED	25			0,19	230 V AC	8						11	120
Calpeda	NCE EI				25-60	25		A	0,27	230 V AC	6	3,15	PP	CP	CS	-	8,4	53
Calpeda	NCE				25-60	25		A		230 V AC	5	4,00	PP	CP	CS	-	5,9	62
DAB	Evosta				40-70/180				0,23	230 V AC	6,88	3,30	PP	-	CS	-	6	44
DAB	Evotron				40/180				0,19	230 V AC	4	2,70	PP	CP	CS	-	4	23
DAB	Evotron				60/180				0,21	230 V AC	6	3,60	PP	CP	CS	-	4	43
DAB	Evotron				80/180				0,23	230 V AC	8	4,20	PP	CP	CS	-	4	64
DAB	Evotron SOL				40/180				0,19	230 V AC	4	2,70	PP	CP	CS	-	4	23

¹⁰ V tabulce uvedené údaje nejsou veškerými údaji uváděnými výrobcí nebo prodejci čerpadel. Část parametrů, které nemají vliv na celkové hodnocení čerpadel uváděné v práci, nebyly do tabulky uvedeny. Stav platný k 4/2018. Aktuální údaje se mohou lišit.

Výrobce / Prodejce	Označení čerpadla	PN	Teplotní třída TF	Ext. řízení čerpadla	Typ	DN	Eta max (%)	Energetická třída	EEI S	Napájecí napětí	Dopravní výška max. (m)	Obj. průtok max. (m³/h)	Proporciální tlak	Konst. tlak	Konst. ot.	Autoadapt	Přikon min. (W)	Přikon max. (W)
DAB	Evotron SOL				60/180				0,21	230 V AC	6	3,60	PP	CP	CS	-	4	43
Grundfos	Alpha Solar				25-75 180	25			0,20	230 V AC	7,5	3,50	PP	CP	-	-	2	52
Grundfos	Alpha1 L				15-65 130	15	40		0,20	230 V AC	6,5	3,70	PP	CP	CS	-	4	60
Grundfos	Alpha1 L				25-40 180	25	40		0,20	230 V AC	4	2,70	PP	CP	CS	-	4	25
Grundfos	Alpha1 L				25-60 180	25	40		0,20	230 V AC	6	3,30	PP	CP	CS	-	4	45
Grundfos	Alpha1 L N				25-40 N 180	25	40		0,20	230 V AC	4	2,70	PP	CP	CS	-	4	25
Grundfos	Alpha1 L N				25-60 N 180	25	40		0,20	230 V AC	6	3,30	PP	CP	CS	-	4	45
Grundfos	Alpha2	10	110		25-40 180	25	48		0,15	230 V AC	4	2,40	PP	CP	CS	A	3	18
Grundfos	Alpha2	10	110		25-40 A 180	25	40		0,18	230 V AC	4	2,20	PP	CP	CS	A	3	18
Grundfos	Alpha2	10	110		25-50 180	25	49		0,16	230 V AC	5	3,00	PP	CP	CS	A	3	26
Grundfos	Alpha2	10	110		25-60 180	25	50		0,17	230 V AC	6	3,40	PP	CP	CS	A	3	34
Grundfos	Alpha2	10	110		25-60 A 180	25	42		0,20	230 V AC	6	2,90	PP	CP	CS	A	3	34
Grundfos	Alpha2	10	110		25-80 180	25	51		0,18	230 V AC	8	3,90	PP	CP	CS	A	3	50
Grundfos	Alpha2 L	10	110		25-40 180	25	38		0,23	230 V AC	4	2,40	PP	CP	CS		5	22
Grundfos	Alpha2 L	10	110		25-60 180	25	39		0,23	230 V AC	6	3,20	PP	CP	CS		5	45
Grundfos	Alpha2 L N	10	110		25-40 N 180	25	38		0,23	230 V AC	4	2,40	PP	CP	CS		5	22
Grundfos	Alpha2 L N	10	110		25-50 N 180	25	38		0,23	230 V AC	5	2,70	PP	CP	CS		5	32
Grundfos	Alpha2 L N	10	110		25-60 N 180	25	39		0,23	230 V AC	6	3,10	PP	CP	CS		5	45
Grundfos	Alpha2 N	10	110		25-40 N 180	25	48		0,15	230 V AC	4	2,50	PP	CP	CS		3	18
Grundfos	Alpha2 N	10	110		25-50 N 180	25	49		0,16	230 V AC	5	3,00	PP	CP	CS		3	26
Grundfos	Alpha2 N	10	110		25-60 N 180	25	50		0,17	230 V AC	6	3,40	PP	CP	CS		3	34
Grundfos	Alpha2 N	10	110		25-80 N 180	25	51		0,18	230 V AC	8	3,90	PP	CP	CS		3	50
Grundfos	Alpha3	10	110		25-40 180	25	48		0,15	230 V AC	4	2,50	PP	CP	CS		3	18
Grundfos	Alpha3	10	110		25-40 A 180	25	40		0,18	230 V AC	4	2,20	PP	CP	CS		3	18
Grundfos	Alpha3	10	110		25-50 180	25	48		0,16	230 V AC	5	3,00	PP	CP	CS		3	26
Grundfos	Alpha3	10	110		25-60 180	25	50		0,17	230 V AC	6	3,40	PP	CP	CS		3	34
Grundfos	Alpha3	10	110		25-60 A 180	25				230 V AC			PP	CP	CS			
Grundfos	Alpha3	10	110		25-80 180	25	51		0,18	230 V AC	8	3,90	PP	CP	CS		3	50
Halm	HEP Optimo	10	110		25-4.0 G180	25			0,17	230 V AC	4	2,80	PP	CP	CS		4	20
Halm	HEP Optimo	10	110		25-6.0 G180	25			0,18	230 V AC	6	3,40	PP	CP	CS		5	37
Halm	HEP Optimo	10	110		25-8.0 G180	25			0,20	230 V AC	8	4,40	PP	CP	CS		6	64
Halm	HEP Optimo Basic	10	95		25-4.0 G180	25			0,20	230 V AC	4	2,75	PP	CP	CS		4	23
Halm	HEP Optimo Basic	10	95		25-6.0 G180	25			0,23	230 V AC	6	3,60	PP	CP	CS		4	50
Halm	HEP Optimo Basic	10	95		25-7.0 G180	25			0,23	230 V AC	7	4,75	PP	CP	CS		4	60
Halm	HEP Optimo L	10	95	ANO	25-8.0 G180	25			0,23	230 V AC	8	9,30	PP	CP	CS		15	180
Halm	HEP Optimo L+	10	110	ANO	25-6.0 G180	25			0,20	230 V AC	6	7,40	PP	CP	CS		6	112
Halm	HEP Optimo (N) T1	10	110		25-4.0 N180	25			0,17	230 V AC	4	2,80	PP	CP	CS		4	20
Halm	HEP Optimo (N) T1	10	110		25-6.0 N180	25			0,18	230 V AC	6	3,40	PP	CP	CS		5	37
Halm	HEP Optimo (N) T1	10	110		25-8.0 N180	25			0,20	230 V AC	8	4,40	PP	CP	CS		6	64
Jablotron	CP-201P	10	110			25			0,23	12 V DC	4	2,20	PP	CP	CS		6	22
KSB	Calio S	10	95		25-40	25			0,20	230 V AC	4	2,50	PP	CP	CS		4	23
KSB	Calio S	10	95		25-60	25			0,20	230 V AC	6	3,45	PP	CP	CS		4	47
KSB	Calio S BMS	10	110	ANO	25-60				0,20	230 V AC	6	7,60	PP	CP	CS		8	100
Laing (Xylem)	E 10	10	110							115 V AC / 60 Hz	4,4	3,60	PP	CP	CS		4	60
Bell & Gossett (Xylem)																		

P3: Přehled vybraných oběhových čerpadel a přehled jejich parametrů /

Výrobce / Prodejce	Označení čerpadla	PN	Teplotní třída TF	Ext. řízení čerpadla	Typ	DN	Eta max (%)	Energetická třída	EEI S	Napájecí napětí	Dopravní výška max. (m)	Obj. průtok max. (m³/h)	Proporciální tlak	Konst. tlak	Konst. ot.	Autoadapt	Přikon min. (W)	Přikon max. (W)
Lowara (Xylem)	Ecocirc Basic/Premium	10	110		25-4/180	25			0,20	230 V AC	4	2,50	PP	CP	CS		4	23
Lowara (Xylem)	Ecocirc Basic/Premium	10	110		25-6/180	25			0,23	230 V AC	6	3,30	PP	CP	CS		4	42
Nocchi (Pentair)										230 V AC								
Salmson	Sirix home	10	110		4 0 - 25/180				0,20	230 V AC	4	3,20	PP	CP	CS		3	20
Salmson	Sirix home	10	110		6 0 - 25/180				0,20	230 V AC	6	4,30	PP	CP	CS		3	40
Salus	MP100A	10	110							230 V AC	5		PP	CP	CS		5	32
Salus	MP200A	10	110	ANO						230 V AC	6		PP	CP	CS		5	45
Salus	MP280A	10	110							230 V AC	6		PP	CP	CS		5	45
Smedegaard (DP Pumps)	SimFlex		95		25-40					230 V AC	3	2,70					4	23,1
Smedegaard (DP Pumps)	SimFlex		95		25-60					230 V AC	4,2	2,40					4	47,1
Smedegaard (DP Pumps)	Magneta	10	110	ANO	25-40				0,23	230 V AC	4,2	5,60					6	50
Smedegaard (DP Pumps)	Magneta	10	110	ANO	25-60				0,23	230 V AC	6,1						8	100
Taco (Askoll)																		
Weberman/Ferro	GPA II	10	110		25-4-180				0,23	230 V AC	4,1	2,40					5	22
Weberman/Ferro	GPA II	10	110		25-6-180				0,23	230 V AC	6,2	3,00					5	45
Weberman/Ferro	GPA II	10	110		25-8-180				0,23	230 V AC	8	4,00					5	70
Wilo	Star-Z NOVA	10	70															
Wilo	Stratos PICO	10	110		25/1-4				0,20	230 V AC	4	3,18	PP	CP	CS		3	25
Wilo	Stratos PICO	10	110		25/1-6				0,20	230 V AC	6	4,30	PP	CP	CS		3	40
Wilo	Stratos PICO-Z	10								230 V AC								
Wilo	Yonos PICO	10	95		25/1-4				0,20	230 V AC	4,2	2,75	PP	CP	CS		4	20
Wilo	Yonos PICO	10	95		25/1-6				0,20	230 V AC	6	3,60	PP	CP	CS		4	40
Wilo	Yonos PICO	10	95		25/1-8				0,23	230 V AC	7,5	4,40	PP	CP	CS		4	75
Wilo	Yonos ECO -BMS	10	110	ANO	25/1-5				0,20	230 V AC	5,2	2,80	PP	CP	CS		5	33
Wilo	Yonos PICO-STG	10	110		25/1-7,5				0,23	230 V AC	7,5	4,50	PP	CP	CS			
Wilo	Varios	10								230 V AC								

P4: Výpočet parametrů spalin a odkouření

Tab. P4 Výpočet parametrů spalin a odkouření

		Hodnoty volené dle literatury (nemění se)	
		Hodnoty volené (mohou se měnit)	
		Hodnoty, které je potřeba při výpočtu zvolit	
		Hodnoty udávané výrobcem	
		Pomocné hodnoty nebo hodnoty spočítané v předchozí části	
Typ spalovaného paliva:			
		Palivové dřevo - buk	Palivové dřevo - buk
Výhřevnost paliva	Q _{ir} (MJ/kg)	14,42	14,42
Prvkový rozbor paliva:			
uhlík	Cr (%) =	34,17	34,17
vodík	H2r (%) =	4,88	4,88
síra	Sr (%) =	0	0
dusík	N2r (%) =	0,18	0,18
kyslík	O2 (%) =	40,94	40,94
popel:	Ar (%) =	0,83	0,83
voda:	H2O (%) =	19	19
součet (%) =		100	100
Výkon kotle:			
Výrobcem udávaný jmenovitý výkon kotle	P _{jm} (kW) =	16	16
Udávaná účinnost kotle	η (%) =	89,1	89,1
Procentuální zatížení kotle	% (P _{jm}) =	100	100
Reálný tepelný výkon kotle	P _{zk} (kW) =	16,00674075	16,00674075
Minimální objemy vzduchu a spalin z prvkového rozboru paliva:			
a) Pro "normální" fyzikální podmínky			
Teoretické množství vzduchu:			
Podíl prchavé síry v síře v palivu	Sr/Sr _{prch} (%)=	50	50
	Sr _{prch} (%) =	0	0
Minimální množství kyslíku ke spálení kg paliva	V _{O2_min} (m3N/kg) =	0,621619542	0,621619542
Minimální množství suchého vzduchu ke spálení kg paliva	V _{vz_s_min} (m3N/kg) =	2,967157717	2,967157717
Relativní vlhkost vzduchu	φ (%) =	70	70
Teplota spalovacího vzduchu	tvz (°C) =	22	22
Nadmořská výška	h (m)	237	237
Barometrický tlak vzduchu	pc (Pa) =	98516,567	98516,567
Parciální tlak syté vodní páry	p'' _{H2O_vzd} (Pa) =	2645,104464	2645,104464
Objem vodní páry připadající na m3 suchého vzduchu při daném tlaku a vlhkosti	V _{H2O} (-) =	0,019154536	0,019154536
Faktor poměrného zvětšení objemu s. vzduchu o objem vodní párypři dané relativní vlhkosti a teplotě vzduchu	f =	1,019154536	1,019154536
Minimální množství vlhkého vzduchu při dokonalém spálení kg paliva	V _{vz_v_min} (m3N/kg) =	3,023992247	3,023992247
Teoretické množství spalin:			
Objem CO2 ve spalinách	V _{CO2} (m3N/kg) =	0,634515538	0,634515538
Objem SO2 ve spalinách	V _{SO2} (m3N/kg) =	0	0
Objem N2 ve spalinách	V _{N2} (m3N/kg) =	2,34697763	2,34697763
Objem Ar ve spalinách	V _{Ar} (m3N/kg) =	0,027297851	0,027297851
Minimální množství suchých spalin při dokonalém spálení	V _{sp_s_min} (m3N/kg) =	3,008791019	3,008791019
Maximální množství CO2 ve spalinách	V _{CO2_max} (%) =	21,08872082	21,08872082
Maximální množství SO2 ve spalinách	V _{SO2_max} (%) =	0	0
Minimální objem vodní páry	V _{H2O_min} (m3N/kg) =	0,835582008	0,835582008
Minimální teoretické množství vlhkých spalin	V _{sp_v_min} (m3N/kg) =	3,844373028	3,844373028
Skutečné množství vzduchu a spalin:			
Přebytek vzduchu	α (-) =	2,34	2,34
Skutečné množství suchého vzduchu s přebytkem vzduchu	V _{vz_s} (m3N/kg) =	6,943149058	6,943149058
Skutečné množství vlhkého vzduchu s přebytkem vzduchu	V _{vz_v} (m3N/kg) =	7,076141858	7,076141858
Skutečné množství suchých spalin s přebytkem vzduchu	V _{sp_s} (m3N/kg) =	6,98478236	6,98478236
Skutečné množství vlhkých spalin s přebytkem vzduchu	V _{sp_v} (m3N/kg) =	7,896522638	7,896522638

P4: Výpočet parametrů spalín a odkouření / 0 _____

Skutečné množství CO2 ve spalínách	w_CO2 (obj. %) =	8,055016161	8,055016161
Skutečné množství SO2 ve spalínách	w_SO2 (obj. %) =	0	0
Skutečné množství H2O ve spalínách	w_H2O (obj. %) =	11,54609846	11,54609846
Skutečné množství Ar ve spalínách	w_Ar (obj. %) =	0,808925324	0,808925324
Skutečné množství O2 ve spalínách	w_O2 (obj. %) =	10,54856959	10,54856959
Skutečné množství N2 ve spalínách	w_N2 (obj. %) =	69,02074649	69,02074649
b) Při teplotě a tlaku na vstupu a výstupu z kotle			
Skutečné množství vzduchu a spalín:			
Hmotnostní tok paliva	M_pal (kg/hod) =	4,485	4,485
	M_pal (kg/s) =	0,001245833	0,001245833
Teplota spalín na výstupu z kotle	T_spal (°C) =	165	165
Změřený/udávaný tah za kotle	p_k (Pa) =	13	13
Skutečný obj. průtok vlhkého vzduchu při teplotě a tlaku vzduchu	V_vz_v (m3/s) =	0,009797679	0,009797679
Skutečný obj. průtok such. spalín při dané teplotě a tlaku spalín	V_sp_s (m3/s) =	0,014361141	0,014361141
Skutečný obj. průtok vodní páry ve spalínách při dané teplotě a tlaku	V_H2O (m3/s) =	0,001874594	0,001874594
Skutečný obj. průtok vlh. spalín při dané teplotě a tlaku spalín	V_sp_v (m3/s) =	0,016235735	0,016235735
Výpočet entalpie spalín na výstupu z kotle:			
Objem CO2 při dané teplotě spalín	V_CO2 (m3N/kg) =	0,634515538	0,634515538
Objem N2 při dané teplotě spalín	V_N2 (m3N/kg) =	2,34697763	2,34697763
Objem H2O při dané teplotě spalín	V_H2O (m3N/kg) =	0,835582008	0,835582008
Objem SO2 při dané teplotě spalín	V_SO2 (m3N/kg) =	0	0
Objem Ar při dané teplotě spalín	V_Ar (m3N/kg) =	0,027297851	0,027297851
Měrná entalpie CO2 při dané teplotě spalín	I_CO2 (kJ/m3N) =	289,9990046	289,9990046
Měrná entalpie N2 při dané teplotě spalín	I_N2 (kJ/m3N) =	214,3406183	214,3406183
Měrná entalpie H2O při dané teplotě spalín	I_H2O (kJ/m3N) =	250,3842277	250,3842277
Měrná entalpie SO2 při dané teplotě spalín	I_SO2 (kJ/m3N) =	320,2215582	320,2215582
Měrná entalpie Ar při dané teplotě spalín	I_Ar (kJ/m3N) =	153,410473	153,410473
Entalpie stechiometrických spalín	I_sp_min (kJ/kg) =	900,465843	900,465843
Měrná entalpie suchého vzduchu	I_vz (kJ/m3N) =	219,0606914	219,0606914
Entalpie minimálního množství vzduchu	I_vz_min (kJ/kg) =	664,2180908	664,2180908
Entalpie spalín na výstupu z kotle	I_sp (kJ/kg) =	1790,518085	1790,518085
	I_sp (kW) =	2,230687114	2,230687114
Výpočet rosného bodu spalín:			
a) ČSN EN 13384-1+A2 (pouze podle hodnot uváděných v normě)			
Výpočtový součinitel obsahu vodní páry ve spalínách	fw (%) =	149	149
Obsah oxidu uhličitýho v suchých spalínách	σCO2 (%) =	9,5	9,5
Obsah vodní páry ve spalínách	σH2O (%) =	7,093690852	7,093690852
Tlak venkovního vzduchu	pL (Pa) =	98516,567	98516,567
Parciální tlak vodní páry ve spalínách	pd_H2O (Pa) =	6988,460701	6988,460701
Teplota rosného bodu vodní páry ve spalínách	tp_H2O (°C) =	38,99818313	38,99818313
Konverzní činitel SO2 na SO3	Kf (%) =	2	2
Výpočtový součinitel přírůstku rosného bodu	fs1 (K) =	80	80
Výpočtový součinitel přírůstku rosného bodu	fs2 (K) =	7	7
Zvýšení rosného bodu při SO3 ve spalínách	Δtsp (K) =	84,85203026	84,85203026
Rosný bod spalín	tp_sp (°C) =	123,8502134	123,8502134
b) ČSN EN 13384-1+A2 (podle hodnot z normy a hodnot vypočtených ze stechiometrie)			
Výpočtový součinitel obsahu vodní páry ve spalínách	fw (%) =	77,26179193	77,26179193
Obsah oxidu uhličitýho v suchých spalínách	σCO2 (%) =	9,012273853	9,012273853
Skutečný objem vodní páry ve spalínách	V_H2O (m3N/kg) =	0,911740278	0,911740278
Obsah vodní páry ve spalínách	σH2O (%) =	11,54609846	11,54609846
Tlak venkovního vzduchu	pL (Pa) =	98516,567	98516,567
Parciální tlak vodní páry ve spalínách	pd_H2O (Pa) =	11374,81982	11374,81982
Teplota rosného bodu vodní páry	tp_H2O (°C) =	48,38535299	48,38535299
Konverzní činitel SO2 na SO3	Kf (%) =	1,5	1,5
Výpočtový součinitel přírůstku rosného bodu	fs1 (K) =	80	80
Výpočtový součinitel přírůstku rosného bodu	fs2 (K) =	7	7
Zvýšení rosného bodu při SO3 ve spalínách	Δtsp (K) =	82,83825576	82,83825576
Rosný bod spalín	tp_sp (°C) =	131,2236087	131,2236087
c) empiricky (skripta docenta Dlouhého)			
Součinitel β	β (-) =	254,28	254,28
Měrná sírnatost Sr	Sr (%kg/MJ) =	0	0
Měrná popelnatost Ar	Ar (%kg/MJ) =	0,057558946	0,057558946
Rosný bod	t_r (°C) =	48,38535299	48,38535299
d) empiricky podle Verhoffs, Banchera, Perryho a Kiang			
Ze složek spalín - naměřených nebo dopočítaných ze stechiometrie			
Přepočet Ar ve spalínách na podmínky při spalování	V_Ar (m3/s) =	7,95801E-05	7,95801E-05

Množství O ₂ ve spalínách	w_O ₂ (obj. %) =	10,54856959	10,54856959
Množství CO ₂ ve spalínách	w_CO ₂ (obj. %) =	8,055016161	8,055016161
Množství CO ve spalínách	w_CO (obj. %) =	0	0
Množství N ₂ ve spalínách	w_N ₂ (obj. %) =	69,04139047	69,04139047
Množství NO _x ve spalínách	w_NO _x (obj. %) =	0	0
Množství C _x H _y ve spalínách	w_C _x H _y (obj. %) =	0	0
Množství H ₂ O ve spalínách	w_H ₂ O (obj. %) =	11,54609846	11,54609846
Množství SO ₂ ve spalínách	w_SO ₂ (obj. %) =	0	0
Množství Ar ve spalínách	w_Ar (obj. %) =	0,808925324	0,808925324
Množství SO ₃ ve spalínách	w_SO ₃ (obj. %) =	0	0
Konverze SO ₂ na SO ₃	K (%) =	1,5	1,5
Parciální tlak H ₂ O	p''_H ₂ O (Pa) =	11373,31883	11373,31883
Parciální tlak H ₂ O	p''_H ₂ O (mmHg) =	85,30690685	85,30690685
Rosný bod par H₂O	t_r_H₂O (°C) =	48,19314005	48,19314005
Parciální tlak SO ₂	p''_SO ₂ (Pa) =	0	0
Parciální tlak SO ₂	p''_SO ₂ (mmHg) =	0	0
Rosný bod par SO₂	t_r_SO₂ (°C) =	0	0
Parciální tlak SO ₃	p''_SO ₃ (Pa) =	0	0
Parciální tlak SO ₃	p''_SO ₃ (mmHg) =	0	0
Rosný bod par SO₃	t_r_SO₃ (°C) =	0	0
Ochlazení spalín vlivem průchodu spalínovou cestou			
Venkovní prostředí			
Venkovní teplota vzduchu	t _L (°C) =	15	15
		15	15
		0	0
	T _L (K) =	288,15	288,15
Teplota v okolí komína nebo kouřovodu	t _u (°C) =	15	15
	T _u (K) =	288,15	288,15
Teplota vzduchu v okolí komína	t _{u0} (°C) =	0	0
	T _{u0} (K) =	273,15	273,15
	t _{ub} (°C) =	15	15
	T _{ub} (K) =	288,15	288,15
	t _{uh} (°C) =	20	20
	T _{uh} (K) =	293,15	293,15
	t _{ul} (°C) =	0	0
	T _{ul} (K) =	273,15	273,15
	t _{uu} (°C) =	0	0
	T _{uu} (K) =	273,15	273,15
Plynová konstanta vzduchu	R _L (J/kgK) =	288	288
Nadmořská výška	z (m) =	143	143
Tlak venkovního vzduchu	p _L (Pa) =	98653,64215	98653,64215
Hustota venkovního vzduchu	ρ_L (kg/m³) =	1,188781428	1,188781428
Stanovení teplot spalín			
Součinitel bezpečnosti proudění spalín	Se (-) =	1,5	1,5
Korekční součinitel teplotní nestability	Sh (-) =	0,5	0,5
		0,5	0,5
		1	1
Výpočtový součinitel plynové konstanty spalín	f _R (1/%) =	-0,0014	-0,0014
Plynová konstanta spalín	R (J/kgK) =	284,3662512	284,3662512
Stanovení hustoty spalín na vstupu do kouřovodu			
Hustota vlhkého vzduchu vztažená k teplotě spalovacího vzduchu	ρ _{vz_v} (kg/m ³) =	1,15431656	1,15431656
Hustota stechiometrických spalín	ρ _{sp_min} (kg/m ³) =	1,280771476	1,280771476
Hustota vlhkých spalín pro fyzikální normální podmínky	ρ _{sp_v} (kg/m ³) =	1,215880351	1,215880351
Hustota vlhkých spalín při dané teplotě za kotlem	ρ _{sp_v} (kg/m ³) =	0,737918685	0,737918685
Hmotnostní tok spalín vzhledem k teplotě spalín na výstupu z kotle	m_v (kg/s) =	0,011980652	0,011980652
a) Kouřovod			
Teplota spalín ve výstupním spalínovém hrdle generátoru	t _{w_v} (°C) =	165	165
Teplota spalín na vstupu do kouřovodu	T _{w_v} (K) =	438,15	438,15
Průměr kouřovodu	φ _{k_v} (mm)	160	160
Vnitřní obvod průřezu kouřovodu	U _v (m)	0,502654825	0,502654825
Průměr průřezu kouřovodu	A _v (m ²) =	0,020106193	0,020106193
Hydraulický průměr průřezu kouřovodu	D _{h_v} (m) =	0,16	0,16
Střední hustota spalín v kouřovodu	ρ _{mv} (kg/m ³) =	0,827398418	0,827398418
Střední rychlost proudění spalín v kouřovodu	w _v (m/s) =	0,72017149	0,72017149
Entalpie suchého vzduchu			
Entalpie stechiometrických spalín	I _{sp} (kJ/m ³ N) =		
Entalpie minimálního množství vzduchu při teplotě na výstupu z kotle	I _{vz_v} (kJ/m ³ N) =		
Entalpie spalín na výstupu z kotle	I _{sp} (kJ/m ³ N) =		

Výpočtový součinitel měrné tepelné kapacity spalín	$fc0$ (J/kgK%)	10,3	10,3
Výpočtový součinitel měrné tepelné kapacity spalín	$fc1$ (J/kgK2%)	0,015	0,015
Výpočtový součinitel měrné tepelné kapacity spalín	$fc2$ (J/kgK3%)	-0,000012	-0,000012
Výpočtový součinitel měrné tepelné kapacity spalín	$fc3$ (1/%)	0,0083	0,0083
Měrná tepelná kapacita spalín	cp_v (J/kgK) =	1055,997392	1055,997392
Dynamická viskozita spalín	ηA (Ns/m2) =	2,14417E-05	2,14417E-05
Prandtlovo číslo	Pr (-) =	0,712035586	0,712035586
Reynoldsovo číslo	Re (-) =	2701,264062	2701,264062
Střední hodnota drsnosti povrchu kouřovodu	r_v (m) =	0,001	0,001
		0,0005	0,0005
		0,001	0,001
		0,0015	0,0015
		0,002	0,002
		0,003	0,003
		0,005	0,005
Součinitel tření podle drsnosti průřezu kouřovodu	ψv (-) =	0,043675111	0,043675111
Součinitel tření pro hydraulicky hladký povrch	ψsm (-) =	0,015	0,015
Celková délka komína od sopouchu k ústí komína	L_{tot} (m) =	1	1
Nusseltovo číslo v kouřovodu	Nu_v (-) =	22,550035	22,550035
Součinitel tepelné vodivosti spalín	λA_v (W/mK)	0,031799469	0,031799469
Součet místních ztrát v kouřovodu	$\Sigma \xi_v$ (-) =	1,51	1,51
Součinitel přestupu tepla v průřezu kouřovodu	$\alpha_i v$ (W/m2K)	12,19555739	12,19555739
Součinitel přestupu tepla na vnějším povrchu kouřovodu	αa_v (W/m2K)	8	8
		8	8
		23	23
Tloušťka stěny kouřovodu	s_v (m) =	0,0006	0,0006
Tepelná vodivost materiálu kouřovodu	λ_v (W/mK) =	58	58
Tepelný odpor stěny kouřovodu	$(1/\lambda)_v$ (m2K/W) =	1,03448E-05	1,03448E-05
Hydraulický průměr vnějšího límce kouřovodu	D_{ha_v} (m) =	0,16	0,16
Součinitel prostupu tepla pro neproměnlivou teplotu v kouřovodu	k_v (W/m2K) =	6,920307728	6,920307728
Délka kouřovodu	L_v (m) =	1	1
Svislá část potrubí kouřovodu	L_h_v (m) =	0,5	0,5
Součinitel chlazení kouřovodu	K_v (-) =	0,274948883	0,274948883
Střední teplota spalín v kouřovodu	T_{mV} (K) =	419,2956767	419,2956767
Střední teplota spalín v kouřovodu	t_{mV} (°C) =	146,1456767	146,1456767
Teplota spalín v sopouchu komína	T_e (K) =	387,7696923	387,7696923
Teplota spalín v sopouchu komína	t_e (°C) =	114,6196923	114,6196923
b) Komín			
Skutečný obj. průtok vlh. spalín při teplotě a tlaku spalín na výstupu z kouřovodu	V_{sp} (m3/s) =	0,014368243	0,014368243
Hustota spalín při střední teplotě v komínu	ρ_m (kg/m3) =	0,944208746	0,933731438
Průměr komína	ϕ_k (mm)	160	160
Vnitřní obvod komínového průřezu	U (m)	0,502654825	0,502654825
Průřez komínového průřezu	A (m2) =	0,020106193	0,020106193
Hydraulický průměr komínového průřezu	D_h (m) =	0,16	0,16
Rychlost proudění spalín v komínu	w (m/s) =	0,631077348	0,638158604
Měrná tepelná kapacita spalín	cp (J/kgK) =	1044,833951	1045,686088
Dynamická viskozita spalín	ηA (Ns/m2) =		1,9431E-05
Prandtlovo číslo	Pr (-) =		0,708073791
Reynoldsovo číslo	Re (-) =		4906,542385
Střední hodnota drsnosti komínového průřezu	r_v (m) =	0,001	0,001
		0,0005	0,0005
		0,001	0,001
		0,0015	0,0015
		0,002	0,002
		0,003	0,003
		0,005	0,005
Součinitel tření podle drsnosti průřezu komína	ψ (-) =	0,043675111	0,043675111
	ψ_{sm} (-) =	0,027180462	0,02456032
Celková délka komína od sopouchu k ústí komína	L_{tot} (m) =		7
Nusseltovo číslo	Nu (-) =		23,5746712
Součinitel tepelné vodivosti spalín	λA (W/mK)		0,028695768
Součet místních ztrát v kouřovodu	$\Sigma \xi$ (-) =	1,54	1,54
Součinitel přestupu tepla v komínovém průřezu	α_i (W/m2K)	11,56491583	4,228083061
Součinitel přestupu tepla na vnějším povrchu komínu	αa (W/m2K)	8	8
		8	8
		23	23
Tloušťka stěny 1 komínu	s_1 (m) =	0,015	0,015
Tepelná vodivost materiálu 1 komínu	λ_1 (W/mK) =	1,36	1,36
Tloušťka stěny 2 komínu	s_2 (m) =	0,03	0,03
Tepelná vodivost materiálu 2 komínu	λ_2 (W/mK) =	0,054	0,054
Tloušťka stěny 3 komínu	s_3 (m) =	0,045	0,045
Tepelná vodivost materiálu 3 komínu	λ_3 (W/mK) =	0,235	0,235
Tloušťka stěny 4 komínu	s_4 (m) =	0,005	0,005
Tepelná vodivost materiálu 4 komínu	λ_4 (W/mK) =	0,19	0,19
Tepelný odpor stěny komína	$1/\lambda$ (m2K/W) =	0,784390118	0,784390118
Hydraulický průměr vnějšího líce komína	D_{ha} (m) =	0,36	0,36
Součinitel prostupu tepla pro neproměnlivou teplotu v komínu	k (W/m2K) =	1,974562669	1,523260247

Délka komína	L (m) =	6	6
Součinitel chlazení komínu	K (-) =	0,475734113	0,366702125
Střední teplota spalin v komíně	T _m (K) =	367,4236034	371,5464269
Střední teplota spalin v komíně	t_m (°C) =	94,27360337	98,39642694
Výstupní teplota spalin z komína	To (K) =	350,0565348	357,1880453
Výstupní teplota spalin z komína	To (°C) =	76,90653485	84,03804527
Tlakové kritérium: Požadavky na tlak pro podtlakový komín			
$P_Z = P_H - P_R - P_L \geq P_W + P_{FV} + P_B = P_{Ze}$			
$P_Z \geq P_B$	Vyhovuje?		
Statický tah kouřovodu	Ph _v (Pa) =	1,772583665	1,772583665
Statický tah komína	Ph (Pa) =	21,27100398	21,27100398
Tlaková ztráta změnou rychlosti proudění spalin v komíně	Pg (Pa) =	0	0
Součinitel bezpečnosti pro změnu rychlosti proudění spalin	Seg (Pa) =	1	1
Tlakové ztráty třením a tlakové ztráty místní v kouřovodu	Pa (Pa) =	0,382560776	0,382560776
Tlakové ztráty třením a tlakové ztráty místní v komínu	Pe (Pa) =	0,597491929	0,604196326
Tlaková ztráta komínového průduchu	Pr (Pa) =	1,278798669	1,288855265
Tlaková ztráta účinkem větru	Pl (Pa) =	0	0
Minimální tah v sopouchu komína	Pz (Pa) =	21,76478898	21,75473238
Minimální tah ve spalinovém hrdle spotřebiče	Pw (Pa) =	13	13
→ Alternativně podle výpočtu v normě	Pw (Pa) =	18,06179974	18,06179974
Maximální tah pro spotřebič paliv	Pwmax (Pa) =		
Statický tah kouřovodu	Phv (Pa) =	1,772583665	1,772583665
Tlaková ztráta změnou rychlosti proudění spalin v kouřovodu	Pg (Pa) =	0	0
Součinitel bezpečnosti pro změnu rychlosti proudění spalin	Segv (Pa) =	1	1
Tlaková ztráta kouřovodu	Prv (Pa) =	0,573841163	0,573841163
Tlaková ztráta kouřovodu	Pfv (Pa) =	-1,198742502	-1,198742502
Tlaková ztráta z nasávání vzduchu	Pb (Pa) =	4	4
Minimální požadovaný tah v sopouchu komína	Pze (Pa) =	15,8012575	15,8012575
Teplotní kritérium: Požadavky na teplotu pro suché komíny			
$T_{iob} \geq T_G = T_{SP}$	Vyhovuje?		
Teplota kondenzace spalin	Tsp (K) =	321,34314	321,34314
Teplotní rezerva	ΔT (K) =	0	0
Přípustná teplota (teplota kondenzace spalin zvětšená o rezervu)	Tg (K) =	321,34314	321,34314
Přípustná teplota (teplota kondenzace spalin zvětšená o rezervu)	Tg (°C) =	48,19314005	48,19314005
Teplota spalin na vstupu do sopouchu	Te (K) =	387,7696923	387,7696923
Teplota spalin v ústí komínového průduchu při ustáleném stavu	Tob (K) =	350,0565348	357,1880453
Vnitřní hydraulický průměr komínového průduchu	Dh (m) =	0,16	0,16
Vnější hydraulický průměr komína v jeho ústí	Dhao (m) =	0,16	0,16
Součinitel přestupu tepla v ústí komínového průduchu	αi (W/m2K) =	11,56491583	4,228083061
Vnější součinitel přestupu tepla v ústí komínového průduchu	αao (W/m2K) =	8	8
Tepelný odpor stěny komínového systému	1/Λ (m2K/W) =	0,784390118	0,784390118
Tepelný odpor od přídavné izolace části komína nad střechou	(1/Λ)0 (m2K/W) =	0,1	0,1
Součinitel prostupu tepla stěnou komína v jeho ústí	kob (W/m2K) =	0,91252654	0,802630109
Povrchová teplota komínového průduchu v ústí komína při ustáleném stavu	Tiob (K) =	343,9882456	341,2348427
Povrchová teplota komínového průduchu v ústí komína při ustáleném stavu	Tiob (°C) =	70,83824563	68,08484272

